

# TRABAJO FIN DE GRADO



CURSO ACADÉMICO 2013 – 2014

Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos

## **ESTUDIO Y DISEÑO CON CDF DE UNA BOQUILLA TERMINAL DE MANGUERA PARA EL AHORRO DE AGUA EN EL PROCESO DE HIGIENE INDUSTRIAL**

PROFESOR TUTOR: COENEN, WILFRIED -1.1.D12

Daniel Velasco López  
Grado en Ingeniería Mecánica

# ÍNDICE

---

1. INTRODUCCIÓN (pág. 4)
2. PRESENTACION DE LAS EMPRESAS. AMBITO DE TRABAJO (pág. 5)
  - 2.1. GRUPO INCARLOPSA (pág. 5)
    - 2.1.1. SECADEROS DE JAMONES
    - 2.1.2. SECALSA
    - 2.1.3. PROCESO DE SECADO DE JAMONES
    - 2.1.4. RESIDUOS GENERADOS EN EL PROCESADO Y SECADO DEL JAMON
  - 2.2. TELIDE. S.L. (pág. 12)
    - 2.2.1. EQUIPO EN PLANTA
    - 2.2.2. METODO DE LIMPIEZA
    - 2.2.3. CONSUMO DE AGU DE TELIDE EN PLANTA
    - 2.2.4. COSTES DERIVADOS DEL USO DE LA MANGUERA EN EL ACLARADO
3. CONDICIONES DE DISEÑO (pág. 19)
  - 3.1. DESCRIPCION DEL EQUIPO DE LA NAVE (pág. 19)
  - 3.2. DESCRIPCION DEL EQUIPO DE ACLARADO (pág. 23)
    - 3.2.1. BOQUILLA
    - 3.2.2. MANGUERA
  - 3.3. DESCRIPCION DEL FLUIDO DE LIMPIEZA (pág. 26)
  - 3.4. DESCRIPCION DE LA GRASA DEL JAMON (pág. 29)
  - 3.5. RESUMEN DE LAS CONDICIONES INICIALES APORTADAS POR LA INSTALACION Y EVOLUCION DEL FLUIDO EN EL PROCESO (pág. 30)
  - 3.6. PERDIDA DE CARGA EN EL CIRCUITO (pág. 30)
  - 3.7. PERDIDA DE CARGA EN LA BOQUILLA (pág. 42)
  - 3.8. CAIDA DE LA TEMPERATURA EN LA RED DE TUBERIAS (pág. 46)
  - 3.9. PARAMETROS CARACTERISTICOS DE UNA BOQUILLA (pág. 47)
    - 3.9.1. DESCRIPCION DE LAS PARTES DE UNA BOQUILLA
    - 3.9.2. RELACION ENTRE EL ORIFICIO DE ENTRADA Y SALIDA
    - 3.9.3. ESTUDIO DEL AREA PROYECTADA O DE IMPACTO
    - 3.9.4. MATERIALES DE FABRICACION
    - 3.9.5. METODOS DE FABRICACION
  - 3.10. MODELOS ESCOGIDOS A ESTUDIO (pág. 54)
  - 3.11. NORMATIVA Y SUBVENCIONES (pág. 55)
4. PROBLEMA FLUIDO. IMPLEMENTACION AL ORDENADOR (pág. 57)
  - 4.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA FLUIDO (pág. 57)
  - 4.2. MECANICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (pág. 66)
5. SIMULACION POR ORDENADOR DEL PROBLEMA FLUIDO (pág. 70)
  - 5.1. INTRODUCCION Y PLANTEAMIENTO DEL PROCESO (pág. 70)
  - 5.2. RECREACION DE LA ZONA INTERNA POR ORDENADOR: SOLID EDGE (pág. 71)

5.3.	ANSYS WORKBENCH: FLUENT (pág. 73)
5.3.1.	<i>MODULO GEOMETRY</i>
5.3.2.	<i>MODULO MESH</i>
5.3.3.	<i>MODULO SETUP</i>
5.3.4.	<i>MODULO RESULTS</i>
5.4.	VALORACION Y FIABILIDAD DEL RESULTADO (pág. 84)
5.5.	TUTORIALES PASO A PASO (pág. 85)
6.	DISEÑOS Y COMPARACIONES DE LOS MODELOS DE BOQUILLA (pág. 86)
6.1.	RESUMEN DEL PROCESO DE DISEÑO (pág. 86)
6.2.	ESTUDIO DE LA PARED DE LA BOQUILLA (pág. 86)
6.3.	COMPARACION DE LOS PARAMETROS DE LIMPIEZA (pág. 88)
6.3.1.	<i>CAUDAL FRENTE AL AREA DE SALIDA</i>
6.3.2.	<i>VELOCIDAD FRENTE AL AREA DE SALIDA</i>
6.3.3.	<i>COMPARACION ENTRE AREAS DE SALIDA</i>
6.3.4.	<i>EFFECTIVIDAD DE LIMPIEZA</i>
6.4.	CONSIDERACIONES DEL MODELO ESCOGIDO (pág. 94)
7.	DISEÑO Y COMPARACION DE LA BOQUILLA (pág. 98)
7.1.	MODELO PROPUESTO. PLANOS (pág. 98)
7.2.	GASTO MASICO DE AGUA. CALCULO DEL CAUDAL (pág. 99)
7.3.	VELOCIDAD DE SALIDA (pág. 101)
7.4.	OTROS PARAMETROS (pág. 103)
7.4.1.	<i>TURBULENCIA</i>
7.4.2.	<i>PRESION INTERNA</i>
7.5.	DISEÑO DE LA PARTE EXTERNA DE LA BOQUILLA (pág. 106)
8.	CONCLUSIONES DEL PROYECTO (pág. 108)
8.1.	CONSIDERACIONES DEL PROYECTO (pág. 108)
8.2.	COMPARACION DEL CONSUMO DE AGUA (pág. 108)
8.3.	COMPARACION DE LA VELOCIDAD (pág. 109)
8.4.	COMPARACION DEL AREA DE LIMPIEZA Y EFFECTIVIDAD (pág. 109)
8.5.	CRITERIOS DE CONVERGENCIA Y ERRORES (pág. 111)
8.6.	BENEFICIOS EN EL USO DEL DISEÑO PROPUESTO (pág. 113)
8.6.1.	<i>AHORRO POR DISMINUCION DEL CAUDAL</i>
8.6.2.	<i>DISMINUCION DEL TIEMPO DE ACLARADO</i>
8.6.3.	<i>CALCULO DEL COSTE DEL USO DE LA BOQUILLA PROPUESTA</i>
8.6.4.	<i>PREDICCION DEL AHORRO</i>
8.7.	OTRAS CONCLUSIONES (pág. 116)
	BIBLIOGRAFIA (pág. 118)
	ANEXO I MODELADO 3D DEL INTERIOR DE UNA BOQUILLA (pág. 119)
	ANEXO II SIMULACION DE LA ZONA FLUIDA DE UNA BOQUILLA (pág. 127)
	ANEXO III MODELADO 3D DE LA BOQUILLA FINAL (pág. 144)

# 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVO DEL TRABAJO

---

Este trabajo es un estudio real, basado en la idea de disminuir el consumo de agua y tiempo empleado en la operación de limpieza en una empresa. Se pretende proponer una solución mediante el diseño de un terminal de manguera para uso industrial, que reduzca estos parámetros y se traduzca en un ahorro de costes.

El estudio estará enfocado a TELIDE S.L., empresa de higiene industrial. TELIDE S.L es una empresa subcontratada por el del GRUPO INCARLOPSA S.A. encargada de la limpieza y desinfección de sus plantas. Para concretar el trabajo, el estudio se realizará en base a la limpieza de una planta del grupo, SECADEROS DE CORRAL DE ALMAGUER S.A. (SECALSA). El equipo y el proceso de limpieza usado es similar para la limpieza de varios secaderos, mataderos y plantas de procesado de carne del grupo, pero esta planta es sin duda una de las importantes del grupo. Es la planta más nueva, cuenta con un importante desarrollo en tecnología y nuevos procesos, y se pretende que sea hilo conductor y nueva filosofía de trabajo del grupo, además de ser uno de los secaderos más grandes del mundo.

El terminal propuesto (boquilla), debe de ser capaz de con la presión aportada por la instalación, de por un lado retirar los residuos groseros (cuerdas, papeles, cascos de pezuñas del cerdo,...) y por otro ser capaz de retirar la grasa del jamón, previamente tratada con un detergente. La grasa es el condicionante del método de limpieza. Es el residuo generado en el proceso más complicado de eliminar, debido a su alta viscosidad. Esta se encuentra tanto en paredes, suelo y techo, así como en la propia maquinaria.

El ahorro en el consumo de agua se pretende conseguir disminuyendo el caudal característico de la boquilla, sin perder calidad de limpieza. Se prevé que con ello, debido al gran volumen de agua y tiempo empleado en la operación de higiene, se produzca un ahorro considerable para ambas empresas. Así se conseguirá que se reduzcan los elevados costes por el uso de este recurso y el impacto ambiental del uso del mismo.



Imagen 1.1.-Vehículo de la empresa TELIDE en el secadero SECALSA



## 2. PRESENTACIÓN DE LAS EMPRESAS. ÁMBITO DE TRABAJO

### 2.1. GRUPO INCARLOPSA

Como se ha comentado en el punto anterior, el estudio se realizará en base a Secalsa S.A., perteneciente al Grupo Incarlopsa S.A. Esta empresa es una de las más importantes en la industria cárnica. Cuenta con más de 122.000 m2 de instalaciones y más de 1000 profesionales en plantas, ofreciendo productos cárnicos tanto dentro como fuera de España. Dentro de España es la principal suministradora de estos productos a Mercadona, ya se vendan bajo marca Incarlopsa (jamón y elaborados) o bajo marca propia del cliente, Hacendado (salchichas y embutidos). Fuera de España, una gran parte de la producción de jamones se vende al mercado Asiático. La información está disponible en internet y en las principales redes sociales:

**Imagen 2.1.-** Pagina web de la empresa, principal fuente de información de este apartado. <http://www.incarlopsa.es>



### 2.1.1. SECADEROS DE JAMONES

Uno de los puntos fuertes del grupo Incarlopsa es la producción de jamones curados. En el proceso de elaboración de jamones, estos se engrasan con manteca, se salan y se dejan curar. El tiempo mínimo de curación va desde los 6-8 meses hasta años, en función de la calidad y el fin para el cual se requiere el producto. Por este motivo existen estas plantas llamadas secaderos de jamones, donde se preparan y sobre todo se almacenan los jamones durante el su curación. En ellos entran las patas ya cortadas, se preparan, y se dejan curar en bodegas. Tras este proceso finalmente acaban saliendo jamones preparados para la venta y consumo directo.

Así pues, se hace necesario habilitar zonas diferentes en los secaderos; una de procesado y otra de almacenaje. Es mayor superficie de los secaderos están compuestos por cámaras llamadas bodegas por las que van rotando los jamones, donde se almacenan. Estas bodegas presentan se distinguen en función del tiempo y de las condiciones ambientales, humedad y temperatura requeridas.



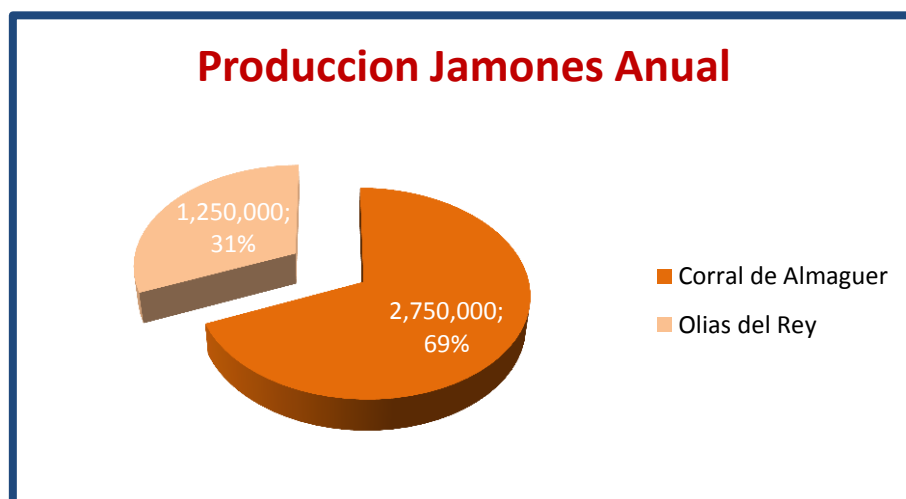
Imagen 2.2.-Jamones tras su proceso de curación

Incarlopsa cuenta con dos plantas dedicadas exclusivamente a la curación y deshuese de jamones. Las dos plantas se sitúan en Corral de Almaguer y en Olías del Rey. Para dar una idea de la magnitud de estas plantas, a continuación se adjuntan los datos de ambos secaderos.

	Planta de Corral de Almaguer	Planta Olías del Rey
Superficie (m2)	172.349	41.935
Instalaciones (m2)	56.277	27.450
Capacidad de producción (jamones/año)	2.750.000	1.250.000
Capacidad de salazón (jamones/día)	15.000	5.000
Bodegas	68	42
Año de construcción	2010	1999
Ultima ampliación	2012	2011
Foto		

**Tabla 2.1.-** Datos de ambos secaderos de jamones, obtenidos de la página web de la empresa

Otro dato importante es la producción anual de jamones, importante para hacerse una idea del volumen de producción y magnitud de las plantas a limpiar:



**Grafica 2.1.-** Datos de ambos secaderos de jamones, obtenidos de la página web de la empresa.

La cadencia máxima entre ambos secaderos puede llegar a unos de cuatro millones de patas al año aproximadamente, lo que hace que diariamente estén entrando saliendo jamones en bodegas.

Otro punto importante son dimensiones de las naves. Se puede ver Corral de Almaguer dobla en superficie construida a la nave de Olías. Para hacerse a la idea del tamaño de la nave de Corral, la superficie construida es equivalente a casi seis campos de futbol. Estos datos del tamaño y las nuevas tecnologías implantadas demuestran porqué Secalsa cobra tanta importancia en el grupo, ya que es uno de los secaderos más grandes y punteros del mundo. Y por este motivo, es la planta escogida para el objeto a estudio.

### 2.1.2. SECALSA

La construcción del secadero es debido a los nuevos contratos y los horizontes de expansión, donde el grupo Incarlopsa se vio obligado a realizar fuertes inversiones, sobre todo tras la firma con Mercadona. Por ello en 2007 se empezó a construir una nueva planta con el afán de ser una de las mejores plantas de secado de jamones en el mundo, Secalsa S.A.

La planta está ubicada en Corral de Almaguer, un pueblo de la provincia de Toledo, en la carretera N-301. La ubicación cobra importancia ya que es una zona árida y el agua es un recurso escaso, de ahí que se haga una valoración tan exhaustiva del agua.



Imagen 2.3.- Mapa e imagen por satélite de las naves que componen Secalsa



La planta es pionera en muchos aspectos tecnológicos, como la implantación de microchips en las piezas, que permite conocer exactamente la procedencia y la ganadería de la que proviene así como las características de las mismas (peso, salazón, materia grasa,...). Además cuenta con otros nuevos procesos de técnicas de corte y procesos, etc... Este nivel de exigencia y requerimiento pretende cuidar hasta el más mínimo detalle y mejorar la eficiencia, y eso pasa por elaborar estudios como este que pretenden hacer una valoración del consumo de agua y posibles sobrecostes.



**Imagen 2.4.-** Imagen panorámica de la entrada de la nave

### **2.1.3. PROCESO DE SECADO DE JAMONES**

Es necesario conocer el proceso de secado de jamones, para así conocer los residuos que se generan en la producción de los mismos y condicionan la posterior limpieza e higiene. La elaboración del jamón ibérico es un proceso único que recorre tres etapas:

#### **a) Preparación de las piezas**

Una vez se han sacrificado los cerdos ibéricos, los jamones frescos procedentes del matadero de Tarancón han de pasar una inspección veterinaria donde se seleccionan sólo aquellos que cumplen los criterios de sanidad y calidad más exigente.

Los jamones seleccionados se clasifican en función de su peso y cantidad de grasa. El resultado de esta clasificación, son partidas de jamones homogéneas que permiten conseguir un resultado óptimo en el proceso de elaboración, especialmente en la fase de salazón, donde el tamaño y la grasa determinan el número de días que deben permanecer apilados en sal.

Después, los jamones se acondicionan, se limpian y se elimina cualquier resto de piel, y de sangre. También es este momento se le realiza el característico corte en forma de "V".



**Imagen 2.5.-**Materia prima que llega en camiones frigoríficos. Se puede observar el corte en V característico.

*b) Curación de las piezas*

Las principales fases en la curación del jamón son: salazón, secado, estufaje o sudado y bodega. Cada una de ellas posee sus propias condiciones diferentes de temperatura y humedad, cada una similar a las 4 estaciones del año. Las condiciones del invierno se dan en la fase del postsalado, las de la primavera en el secado, las del verano en el estufaje y las del otoño en la bodega, como se puede ver en la imagen inferior.



**Imagen 2.6.-** En estas fotos se pueden ver las diferentes fases de curación del jamón y el proceso seguido

Todo el proceso de curación presentado aquí es el de un ciclo de 12 meses pero en función del peso del jamón puede llegar a ser de 24, incluso 36 meses. La limpieza está condicionada por los residuos generados en las etapas de colgado de la pata, las tres últimas. En estas etapas los niveles de higiene alimentaria son muy altos, ya que se llegan a generar bacterias (como por ejemplo el hongo del propio queso roquefort en la paleta). Esto hace necesario realizar varios controles de higiene al día y un proceso de limpieza especial.

### c) Control de calidad

Una vez finalizado el proceso, los especialistas jamoneros comprueban, pieza por pieza que cumplen los parámetros de calidad deseados, diferenciando las valoraciones en tres fases:

- *Conformación*
- *Textura*
- *Cala*

Por otro lado el control de calidad es el encargado de asegurar las condiciones óptimas de higiene, tanto en la recepción de piezas, como en el proceso de elaboración y curado. Como medida de asegurar el máximo nivel, hay controles de calidad contratados por ambas partes, tanto por parte de Telide como por parte de Incarlopsa.

#### 2.1.4. RESIDUOS GENERADOS EN EL PROCESADO Y SECADO DEL JAMON

Los residuos que se generan son varios, dependiendo de la etapa del proceso. Se hace necesario conocer la naturaleza de los residuos generados. A continuación se muestra los diferentes residuos, con el fin de tener conocimiento de cuál es el planteamiento de limpieza:

- *Elementos groseros*: desperdicios sólidos que se generan en el proceso de preparación y secado del jamón: cuerdas, pezuñas, clips metálicos, etc..
- *Sal*: se diferencia entre sal limpia y sal sucia. Por convenio en la limpieza, la sal se puede reutilizar, siempre que no haya sido contaminada. Esta se recoge con palas. El sobrante, la sal contaminada, tiene que ser retirada con manguera.
- *Grasa y manteca*: es lo más difícil de limpiar, debido a su alta viscosidad. Su correcta retirada es necesaria debido a las bacterias que surgen por la humedad en ella. La grasa aparece en toda superficie a la que se expone por el ambiente y es un vital condicionante en parte el diseño de la nave y equipos.

La limpieza con agua se centra, por tanto, en la retirada de sal sucia y la limpieza de la grasa sudada, previamente tratada con un detergente especial. En definitiva, la grasa es condicionante y lo más difícil de limpiar.



**Imagen 2.7.-**Suelo de la bodega al abrir las puertas tras la fase de sudado. Se puede observar la gran cantidad de grasa que se deposita en el suelo

## 2.2. TELIDE S.L.

En los últimos años el equipo de trabajo de TELIDE. S.L. ha gestionado una amplia actividad en el desarrollo e implantación de sistema integrales de limpieza. Su ámbito de trabajo se centra en el sector de la higiene, mayoritariamente en industrias alimentarias. Telide S.L. es en estos momentos la empresa más grande de Castilla– La Mancha en el ámbito de higiene industrial, con más de 200 empleados dedicados exclusivamente a aportar soluciones de higiene integral a este sector empresarial.

Telide S.L. trabaja en varias zonas alejadas entre sí, fundamentalmente en la zona centro Madrid y en la Comunidad de Castilla La Mancha (Cuenca, Ciudad Real y Toledo), donde reúne sus principales clientes en la Industria Alimentaria. Principalmente se basa en la higiene y desinfección especializada en mataderos, industria cárnica (salas de despiece, secaderos, obrador, etc.) y fábricas de elaborados (salchichas y embutidos).

**Imagen 2.8.-**Vista de la página web de Telide S.L. La dirección de la página para conocer más es <http://www.telide.es>



Detrás del alto rendimiento y evolución de la planta, están las empresas subcontratas. Estas deben adaptarse a las altas exigencias de la misma, como a las nuevas normativas europeas para facilitar la venta internacional.

En lo que a Telide S.L. se refiere, a diario se hacen exigentes controles de calidad, y se miden y valoran los gastos, tiempos, procesos... Por ello se lleva a cabo estudios y se reciben subvenciones de I+D con el fin de mejorar la producción. El fin de estos estudios es aumentar la producción de la planta, vía disminuir los recursos utilizados.



Los recursos son el agua, la electricidad, y las materias primas empleadas. La responsabilidad de la empresa de limpieza, es por tanto, minimizar el uso de estos recursos. Así pues este trabajo se centra en ello, intentando disminuir el consumo de agua, tanto por coste, como por ser un bien escaso de la zona.

En el consumo de agua en el secadero, el gasto más alto se da en la limpieza. Por tanto, la importancia que le da el grupo Incarlopsa en el ahorro de recursos se incrementa con el conocimiento de que el agua tiene un sobrecoste elevado. Por tanto, es necesario investigar nuevos métodos y maneras para alcanzar este fin. Por parte de Telide, conseguir esta meta beneficiaría por dos motivos principales, el ahorro en coste de exceso de agua (es un punto en la facturación entre ambas) y le aportaría una ventaja competitiva frente a sus competidoras.

### *2.2.1. EQUIPO EN PLANTA*

Telide a su vez esta subdividida en varios equipos de limpieza según las plantas de trabajo. Cada equipo está estructurado y formado de manera independiente para llevar a cabo su tarea de higiene. En Secalsa, actualmente la empresa se encarga de la limpieza de diferentes zonas de la planta, las cuales se reparten aproximadamente 50.000 m<sup>2</sup> entre bodegas, zonas de procesado y zona de muelles.

Para poder dar servicio, la empresa cuenta actualmente con 39 empleados en nómina a fecha de diciembre de 2013. Aunque la limpieza se divide en tres turnos, el mayor número de empleados trabajando se da en el turno de noche, cuando la fábrica esta parada. Mencionar que se trabaja de manera simultánea en grupos de tres o cuatro operarios en diferentes zonas, para poder dar un servicio integral de limpieza en varias zonas a la vez.



**Imagen 2.9.-**Operaria de Telide S.L. limpiando una cinta transportadora

### 2.2.2. METODO DE LIMPIEZA

Ahora bien, es necesario conocer el método de limpieza para hacerse una idea del uso de agua y las fases en las que sucede. La limpieza se produce en cuatro fases:

- *Limpieza mecánica:* Recogida de elementos groseros, sal y otros desperdicios
- *Primer aclarado o mojado:* Primero con agua para humedecer, calentar la grasa y además facilitar la acción del detergente
- *Espumado:* Con detergente u otro producto. El producto se debe de dejar actuar para reblandecer y mejorar la actuación del mismo
- *Aclarado y Limpieza:* Con agua caliente a presión y de manera mecánica, en el caso de que así se requiriera (rasquetas, cepillos de agua).

Tras observar la metodología de actuación, la etapa con más consumo de agua es la de aclarado, que además es en la que más tiempo se emplea. Es la etapa más importante y más crítica, debido a dos motivos importantes:

- La primera, un mal aclarado puede contaminar el producto.
- La segunda es que la mayor parte de grasa que es el residuo más abundante, importante y difícil de retirar.

En definitiva, el mayor gasto de agua y el más evitable, surge en el aclarado, el cual se produce con agua caliente a presión. Por tanto una reducción del consumo y mejora de potencia de limpieza, ahorraría tiempo y mejoraría el rendimiento de la empresa. La manera de conseguir este objetivo, de una manera fácil, rápida y barata; es investigar un nuevo modelo de boquilla para el aclarado, que será el objeto de estudio del trabajo.



Imagen 2.10.- Resultado de una cinta transportadora del secadero limpia

### 2.2.3. CONSUMO DE AGUA DE TELIDE EN PLANTA

Para obtener una idea del consumo de agua, se realizó un informe 'in situ' en el mes de Marzo de 2013, por parte de la empresa Telide.

Además existen bases de datos con el consumo de agua y otros recursos en la planta, llevado a cabo por el departamento de mantenimiento de Incarlopsa de manera anual. Ellos facilitan una hoja con el gasto de agua de Secalsa cada año, de manera que se puede estimar el consumo mensual.

A continuación se adjunta una hoja de la base de datos con el consumo de agua en 2013 hasta mediados de Noviembre. El dato a obtener en cuenta principalmente es el de agua caliente, empleada en el aclarado.

*CONSUMO DE AGUA SECALSA (COMUNICADO INTERNO)*

*ESTOS DATOS TIENEN CARÁCTER COMPLETAMENTE OFICIAL*



**Documento 2.1.-** Informe del consumo de agua del año 2013

SECALSA ZONA T1,T2	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
Agua Fria	m3	1.969	1.269	1.638	1.294	1.266	974	711	652	879	40	-
Agua Caliente	m3	33	54	86	39	29	27	22	30	37	2	-
Importe Fria - 2,64 €/m3	€	5.198,16	3.350,16	4.324,32	3.416,16	3.342,24	2.571,36	1.877,04	1.826,88	2.320,56	105,60	-
Importe Caliente - 5,54 €/m3	€	182,82	299,16	476,44	216,06	160,66	149,58	121,88	166,20	204,98	11,08	-
<b>TOTAL FACTURA</b>	<b>€</b>	<b>5.380,98</b>	<b>3.649,32</b>	<b>4.800,76</b>	<b>3.632,22</b>	<b>3.502,90</b>	<b>2.720,94</b>	<b>1.998,92</b>	<b>1.993,08</b>	<b>2.525,54</b>	<b>116,68</b>	<b>-</b>

SECALSA ZONA T3,T4	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
Agua Fria	m3	627	711	635	570	600	826	696	476	546	28	-
Agua Caliente	m3	26	30	29	18	11	12	25	19	26	4	-
Importe Fria - 2,64 €/m3	€	1.655,28	1.877,04	1.676,40	1.504,80	1.584,00	2.180,64	1.837,44	1.256,64	1.441,44	73,92	-
Importe Caliente - 5,54 €/m3	€	144,04	166,20	160,66	99,72	60,94	66,48	138,50	105,26	144,04	22,16	-
<b>TOTAL FACTURA</b>	<b>€</b>	<b>1.799,32</b>	<b>2.043,24</b>	<b>1.837,06</b>	<b>1.604,52</b>	<b>1.644,94</b>	<b>2.247,12</b>	<b>1.975,94</b>	<b>1.361,90</b>	<b>1.585,48</b>	<b>96,08</b>	<b>-</b>

TELIDE	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
Telide Agua Fria	m3	679	745	1.260	1.123	1.269	1.270	971	1.028	1.309	54	-
Telide Agua Caliente	m3	5.137	5.114	4.606	4.622	4.891	4.805	4.753	4.204	4.853	251	-
Importe Fria - 2,64 €/m3	€	1.792,56	1.956,80	2.220,24	2.964,72	3.350,16	3.352,80	2.563,44	2.713,92	3.455,76	142,56	-
Importe Caliente - 5,54 €/m3	€	28.458,98	28.331,56	25.517,24	25.805,88	27.095,14	26.619,70	26.331,62	23.290,16	26.885,62	1.390,54	-
<b>TOTAL FACTURA TELIDE</b>	<b>€</b>	<b>30.251,54</b>	<b>30.288,36</b>	<b>28.843,64</b>	<b>28.570,60</b>	<b>30.446,30</b>	<b>29.972,50</b>	<b>28.895,06</b>	<b>26.004,08</b>	<b>30.341,38</b>	<b>1.533,10</b>	<b>-</b>



El volumen de agua usado en la planta es elevado. Tras este informe, cobra valor la importancia del ahorro en el consumo de agua, tanto en cantidad como por el coste producido del mismo.

Para trabajar con un único valor de consumo sobre el que hacer comparaciones, se realizará la media mensual de consumo. Para ello, además del volumen de agua utilizado, es importante conocer el número de horas que se invierte en el aclarado. Para facilitar el cálculo del volumen de agua consumido, nos interesara conocer el gasto de agua medio, con el fin de homogeneizar el cálculo. Para sacar este valor se realizara una simple media aritmética entre los 10 meses en los cuales se conoce el gasto:

$$\bar{X}_{\text{volumen de agua invertido}} = \frac{\sum_{i=1}^n TD}{n} = \frac{5137 + 5114 + \dots + 4853 \text{ m}^3}{10 \text{ meses}}$$

$$\bar{X}_{\text{volumen de agua invertido}} = 4788 \text{ m}^3/\text{mes}$$

Con el caudal de la boquilla actual de 35 l/min se puede despejar los minutos invertidos para ese volumen de agua (Caudal del informe de Telide, mostrado más adelante):

$$t_{\text{uso de manguera al mes}} = \frac{4788 \text{ m}^3/\text{mes}}{35 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{min}} \cdot \frac{1 \text{ hora}}{60 \text{ min}} = 2280 \text{ horas}/\text{mes}$$

Y conociendo las horas usadas al mes, y sabiendo que se trabajan seis días a la semana, considerando un mes de 30 días de media, y restando una media de 5 días domingo y algún festivo:

$$t_{\text{uso de manguera al día}} = \frac{2280 \text{ horas}/\text{mes}}{25 \text{ días}/\text{mes}} = 91,2 \text{ horas}/\text{día}$$

Estas son las horas dedicadas al uso de la manguera de agua caliente. Aunque no todo el tiempo y el volumen de agua es invertido en el uso de la manguera por parte de Telide, si es cierto que en agua caliente, el agua más del 95% del agua caliente es invertido en manguera (el resto se invierte en limpieza de equipo, en el rellenado de cubos).

## 2.2.4. COSTES DERIVADOS DEL USO DE LA MANGUERA

Analizando los costes que se abordan en el objeto de este estudio:

- Por un lado están los costes del agua caliente, que son 5,54 €/m<sup>3</sup> (incluyendo los costes de calentar y osmotizar el agua). Teniendo en cuenta que se consume de media 4788 m<sup>3</sup>/mes:

$$4788 \text{ m}^3/\text{mes} \cdot 5,54 \text{ €/m}^3 = 26.525,53 \text{ €/mes}$$

- Conociendo que las horas de uso de la manguera son 91,2 *horas/día*, y que el precio por contrato es de 12,46 €/hora:

$$91,2 \text{ horas/día} \cdot 12,46 \text{ €/hora} \cdot 25 \text{ días/mes} = 28.636,80 \text{ €/mes}$$

Aproximadamente al mes en Secalsa se gasta en concepto de uso de manguera por la limpieza:

$$C_{\text{total limpieza mes}} = 26.525,53 \frac{\text{€}}{\text{mes}} + 28.636,80 \frac{\text{€}}{\text{mes}} = 55.162,33 \frac{\text{€}}{\text{mes}}$$

$$C_{\text{total limpieza año (12 meses)}} \approx 661.947,96 \text{ €/año}$$

Finalmente, el objeto de este trabajo será conseguir reducir ambos costes, tanto el producido por el tiempo invertido en la limpieza como el ahorro en el consumo del agua.



**Imagen 2.11.**-Operaria limpiando las maquinas empleadas para el transporte y proceso de las patas del cerdo



# 3. CONDICIONES DE DISEÑO

## 3.1. DESCRIPCION DEL EQUIPO DE LA NAVE

A continuación se comentara las máquinas y condiciones que establecerán los parámetros que se usan en la limpieza.

### BOMBAS

La red de distribución de agua esta movida por un equipo de dos bombas en paralelo controladas de manera electrónica con electroválvulas. Existen dos bombas en paralelo trabajando de manera alternativa, por precaución frente a un posible fallo o mantenimiento de una de ellas, y además para afrontar posibles picos de presión. Ambas están ubicadas en el falso techo de la nave, monitorizadas por un centro de control situado al lado del equipo.

El centro de control regula la presión sobre 22 bares. Las siguientes fotografías muestran el valor de la presión en diferentes instantes. De aquí obtendremos el valor de la presión para los cálculos y el diseño.

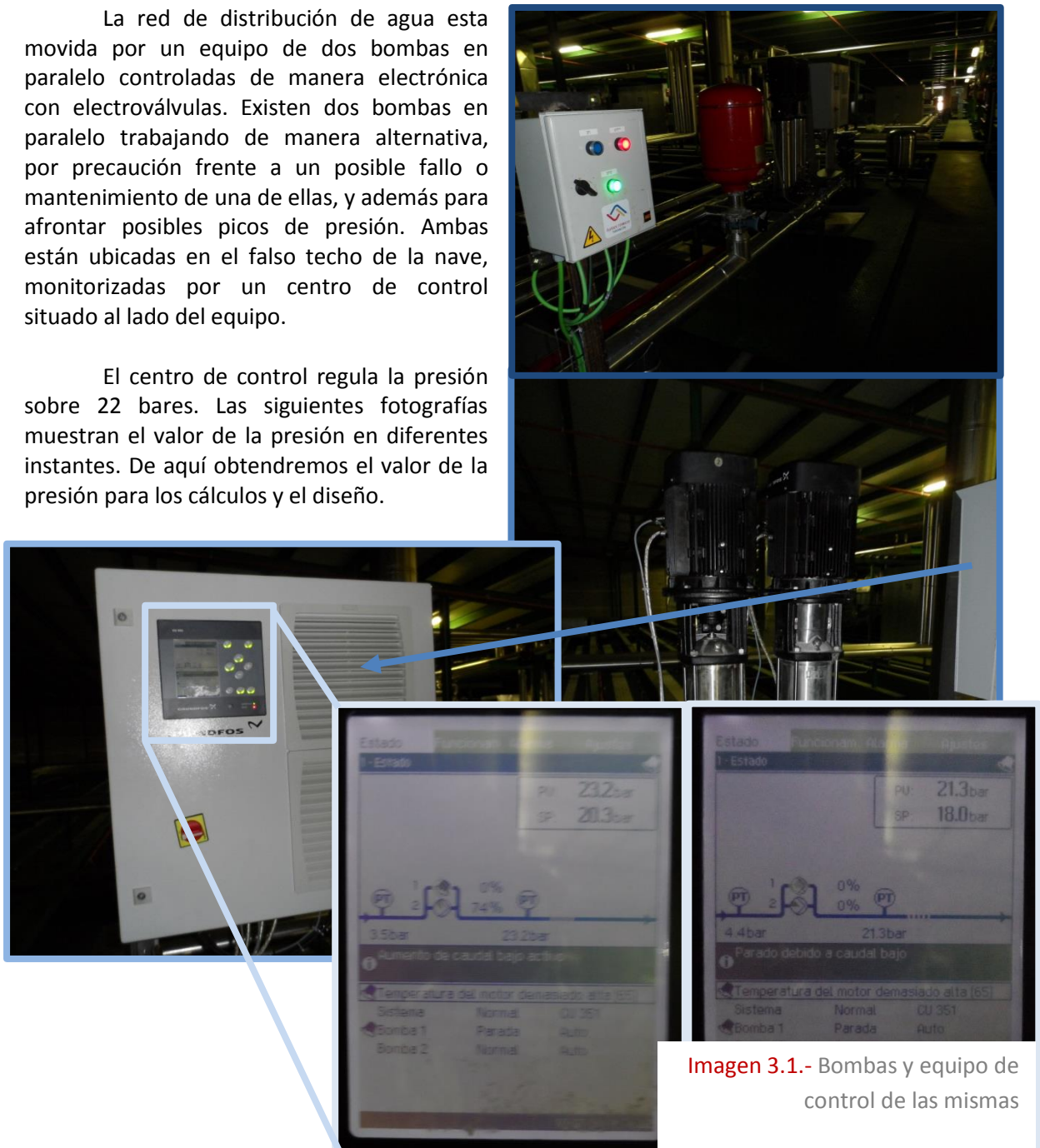


Imagen 3.1.- Bombas y equipo de control de las mismas

## ELECTROVÁLVULAS

Se encuentran colocadas en la entrada de la bomba, para seleccionar el agua que circulara por las instalaciones, entre caliente y fría, y posibles paradas del circuito. Son válvulas activadas por el centro de control.

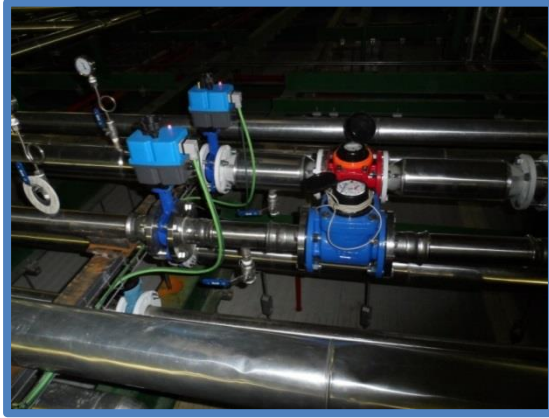


Imagen 3.2.- Electroválvulas controladas electrónicamente

## RED DE TUBERÍAS

Desde el centro de presión hasta que se acopla la manguera para su uso, el agua a presión tanto fría como caliente sigue el mismo circuito formado por tuberías, completadas con componentes para el control del fluido. Las tuberías son de acero inoxidable y siguen la norma de naves industriales sin perder más de un porcentaje específico del calor y presión. Es necesario por otro lado conocer la longitud del tramo de tuberías al punto más extremo de la instalación, necesario para cálculos posteriores. En la siguiente imagen se puede observar la ubicación de la **sala de la caldera (naranja)**, el equipo de las **bombas (azul)** y el **circuito (grana)**.



Imagen 3.3.- Esquema de un ramal de tubería al lado más extremo



Las medidas aproximadamente son 90m x 20m x 12m de altura al punto más extremo del circuito de tuberías. Así pues, al estar el equipo de las bombas en la mitad de la nave del falso techo, la distancia hasta la toma de agua son 45 metros de largo, 10 metros de ancho y 12 metros de alto, de lo que se deduce una longitud máxima de 67 metros.

La red de tuberías tiene además un complejo sistema de válvulas manuales las cuales permiten cambiar entre agua caliente y fría, posibilitando detener el curso del agua en el caso de que se requiriese. Este núcleo de la red de tuberías se encuentra en la sala de calderas.



**Imagen 3.4.-** Núcleo de la red de tuberías de la nave

## CALDERA

La caldera está preparada para trabajar a presión, y está formada por un quemador y un intercambiador tubo carcasa. El agua se calienta en la caldera hasta 90°C debido a que el punto óptimo de limpieza y retirada de la grasa se encuentra como se ha comentado antes entre 50 y 60°C. Por otro lado no se puede calentar más para asegurar minimizar el volumen de agua convertida a vapor.



**Imagen 3.5.-** Imagen de la caldera. Se puede observar como el agua fría entra por la tubería de la izquierda y sale caliente por la tubería de la derecha

### FILTRO-DEPURADOR

Colocado en la entrada de la caldera para seleccionar el agua que circulará por las instalaciones. En él se produce una ligera pérdida de carga, que se tiene en cuenta en los futuros cálculos. Además a lo largo del circuito se dispone de más filtros de tubería para evitar dañar los componentes más importantes de la instalación.

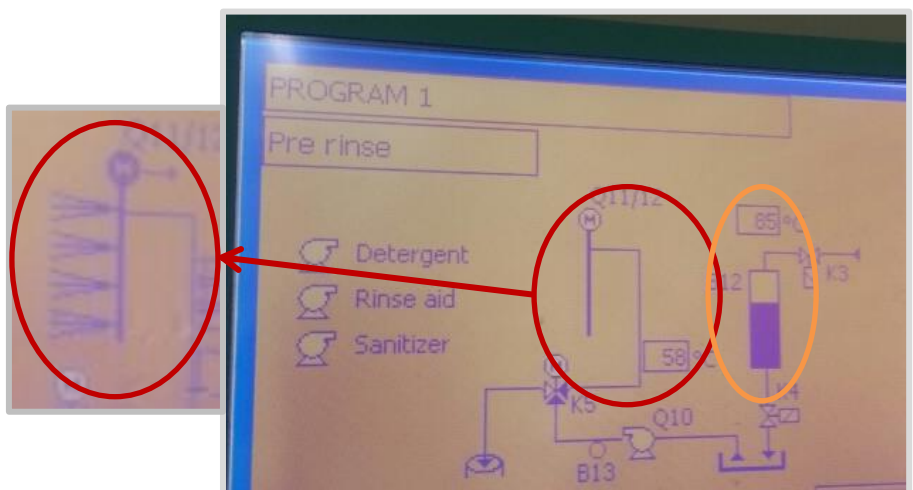


Imagen 3.6.- Filtro de agua y depuradora

### CENTRO DE CONTROL

Una de las nuevas tecnologías implantadas es el centro del control. Aunque el diseño y funcionamiento se mantiene en secreto, ya que es un método pionero, debajo se muestran la información que monitoriza el sistema. El control y la información se puede observar en pantallas táctiles ubicadas en diferentes puntos de las naves. La siguiente foto muestra como la caldera calienta el agua a 85°C (B12) rodeado con una elipse **naranja**. El agua que está disponible en las tomas de agua donde se ubican los satélites, la línea recta, está señalada con una elipse **granate** indica una temperatura de 58°C. Cuando el circuito comienza a funcionar, en el centro de control se abren las tomas como se ve en la ampliación.

Imagen 3.7.- Se observa en la foto una de las pantallas del centro de control. En estado de reposo una vez preparado para la limpieza esta en modo PRE-RINSE. Monitoriza en tiempo real lo que ocurre en el circuito





Son la toma de salida del agua. En los extremos, es donde se acopla la manguera, asegurando la estanqueidad del conjunto. En cada bodega hay al menos un satélite y en los pasillos cada menos de 40 - 50 metros, por norma de construcción de la nave. Esto asegura que las mangueras de 25 metros cubran la nave.

## 3.2. DESCRIPCION DEL EQUIPO DE ACLARADO

### 3.2.1. BOQUILLA ACTUAL

#### *Diseño de la boquilla*

La boquilla actual está fabricada en acero, y tiene una abertura a 35° que facilita la expulsión de agua a presión. El diámetro de acople es para una manguera es M25 normalizada y tiene una longitud total de 66 mm. El orificio de entrada es de 12 mm de diámetro interno y el de salida son dos arcos de circunferencia de longitud 3 mm y altura 2 mm.



**Imagen 3.9.-** Imágenes de la boquilla que actualmente se usa, y como queda acoplada a la manguera

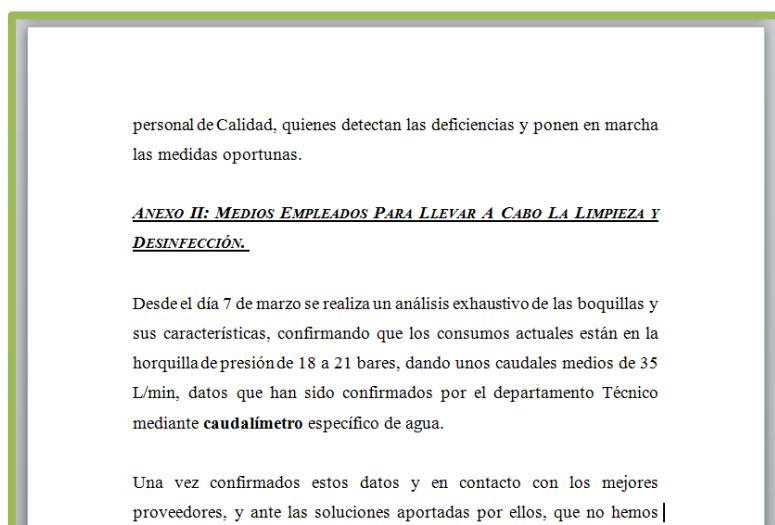
### *Caudal consumido por la boquilla*

El principal parámetro que caracteriza a una boquilla es el caudal. Para conocer el volumen de agua usado, un método rápido y sencillo es colocar un caudalímetro entre la boca de manguera y la boquilla. Este método fue el utilizado en la realización de un informe por parte de Telide en un estudio realizado en Marzo de 2013.

**Imagen 3.10.-** Caudalímetro usado para obtener el dato del caudal en el informe de 2013



En marzo de 2013 se elaboró un informe en el cual se midieron los valores del caudal consiguientes al uso de la boquilla. La siguiente imagen corresponde al documento final que el equipo técnico de Telide presentó al Grupo Incarlopsa.



**Imagen 3.11.-** Extracto del documento donde se establece el valor oficial del caudal de la boquilla

El valor de 35 l/min, fue obtenido mediante una serie de varias pruebas en diferente tomas de agua. Sobre estos valores se hizo la media, teniendo en cuenta los diferentes valores de presión (oscilantes sobre los 20 bares), que condicionan el caudal (**Fuente:** Francisco Varadi, encargado del departamento técnico y colaborador del informe). Este dato de caudal ha sido usado para el cálculo de horas y coste de agua caliente anteriormente.

### Coste de una boquilla

El coste de la boquilla, obtenido de la misma empresa encargada de proveerlas:

Buenas tardes Antonio:

Te paso los precios y los códigos de las referencias solicitadas:

Cuando hagas el pedido, menciona el código para que directamente lo cursen y os llegue con mayor rapidez.

código	Descripción	precio
1214526	LANZA CORTA DESINFECCION AMARILLA 60/30	30,74 €
1214568	LANZA CORTA ESPUMA BLANCO BOQ.50/200	31,59 €
1214507	LANZA CORTA ACL.VERD BOQ. 25/30	29,90 €
SN20367	BOQUILLA ESPUMA INOX 1/2 50/200	5,28 €
SN20366	BOQUILLA ACLAR. INOX 1/4 -M25/30	6,12 €
1214569	BOQ.DESINF.PLAST. 1/4 M 60/30 54-200302	9,28 €

Las lanzas son completas con enlace rápido y protector y las boquillas son simplemente la punta de la lanza.

Para cualquier aclaración no dudes en ponerte en contacto con nosotros.

Un saludo.


  
Bernardo García López  
Processed Food Sector Specialist

Imagen 3.12.- Caudalímetro usado para obtener el dato del caudal en el informe de 2013

La boquilla por tanto referenciada tiene un coste de 6,12 €. Lo importante de este punto es valorar el coste la misma frente al ahorro que puede conseguirse. El bajo coste del terminal frente al gasto del consumo de agua hace viable la inversión.

### 3.2.2. MANGUERA

#### Diseño de la manguera

La manguera esta fabricada de PVC. Su diseño es antiplegable y con comportamiento antidesgaste contra arrastrado por el suelo. Esta preparada para aguantar sobrepresiones de hasta 40 bares y altas temperaturas. En el terminal se acopla un dispositivo que permita acoplar con facilidad la boquilla, con el fin de protegerla y transportarlas a otras zonas rapidamente, y debido a que la vida de una boquilla es menor que la de la manguera.

#### Método de agarre

Para evitar lesiones y facilitar la limpieza dispone de un metodo de asidura. La manguera se usa por operarios formados, debido a que un mal uso puede dar lugar a lesiones. La manera de cogerla es pasandola por encima de el hombro para evitar las frecuentes tenditis que sufren los operarios muñecas, codos y hombros.



Imagen 3.13.- Final de la manguera y agarre



### Datos técnicos de la manguera

El fabricante no adjunta la rugosidad interna de la manguera, dato necesario en cálculos posteriores. El acabado superficial interno es de fibra de poliéster, por lo que el dato habrá que buscarlo tabulado en tablas de rugosidad de materiales. Los datos técnicos han sido sacados del catálogo de la empresa proveedora de la manguera. (Fuente: Catálogo de productos de Agrícola Tarancón S.L.)

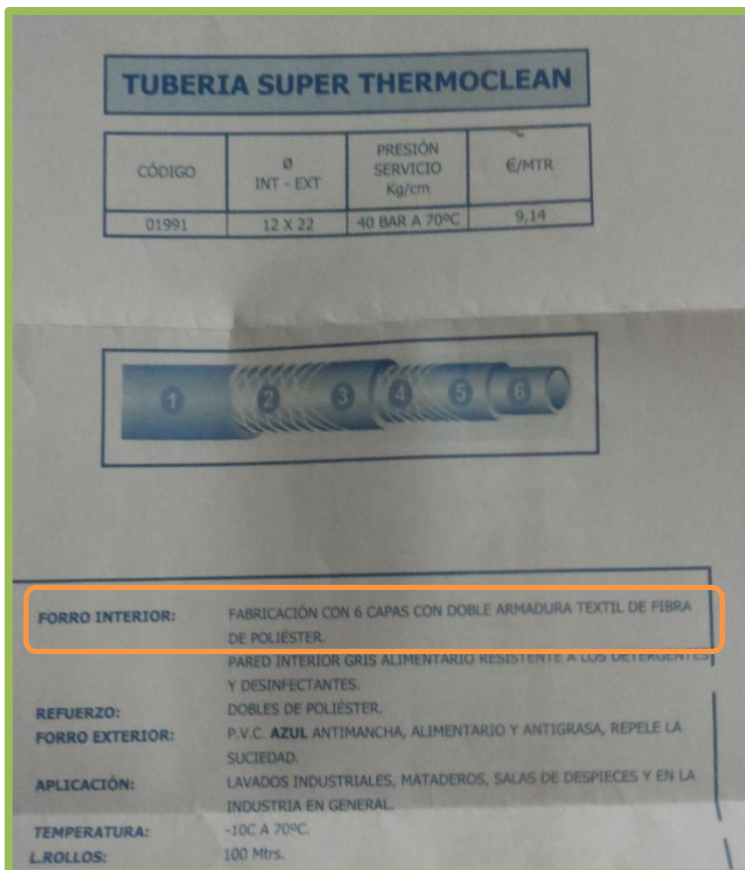
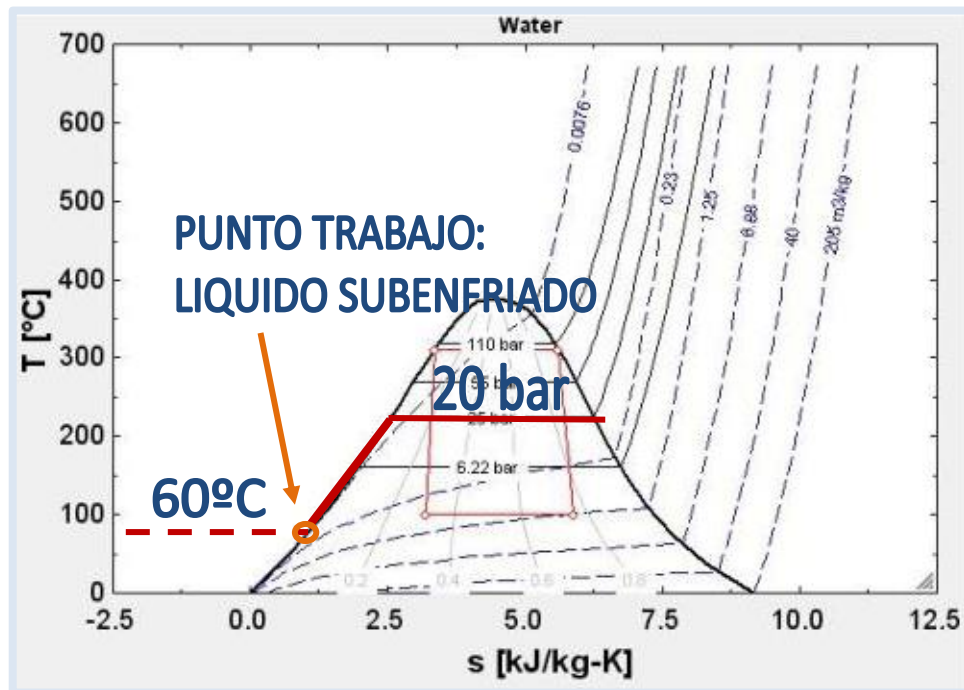


Imagen 3.14.- Hoja con los datos de la manguera. Se observa que el interior es del poliéster

## 3.3. DESCRIPCION DEL FLUIDO DE LIMPIEZA

Hasta este punto los datos que obtenidos por las características del equipo son la temperatura del agua, 60°C, y la presión de 20 bares. Para sacar el resto de parámetros del año, el primer paso es conocer el estado físico del agua. Para ello se usa el diagrama T-s. En la zona interior de la campana hay mezcla agua-vapor, a la izquierda de ella hay líquido subenfriado (o líquido comprimido) y a la derecha hay vapor sobrecalentado. Es necesario para entrar en la tabla conocer dos valores. Como se conoce la temperatura y la presión esto serán los datos de entrada. En el eje de ordenadas se debe de mirar la temperatura en grados centígrados y para la presión se deben de mirar las isobaras, cuya unidad en el diagrama son los bares de presión. Donde corten ambas líneas estará el punto de trabajo. Fuente del diagrama: [ocw.mit.edu/high-school/physics/exam-prep/kinetic-theory-thermodynamics](http://ocw.mit.edu/high-school/physics/exam-prep/kinetic-theory-thermodynamics), de un curso de ingeniería de acceso abierto al público de la universidad de Massachusetts).



Gráfica 3.1.- Diagrama temperatura – entropía. En naranja se encuentra el punto del fluido durante su paso en el circuito

Como el punto está a la izquierda de la campana, lejos de la zona de cambio de fase, el líquido se encuentra en fase de líquido comprimido o subenfriado.

Las propiedades del agua no se pueden obtener de manera certera usando el diagrama, debido a que no tiene resolución para algunos parámetros. En estos casos se debe acudir a tablas de propiedades del agua, donde en función de un parámetro fijo, temperatura o presión, y variando el otro se obtienen los parámetros característicos del agua en ese punto. En el caso de que no estuvieran tabulados el valor exacto habría que interpolar entre los datos más próximos.

A continuación se muestra un extracto de las tablas de un libro de termodinámica.  
**Fuente de las tablas:** Libro 'Fundamentos de la termodinámica técnica', de los autores M.J. Moran y H.N. Shapiro.

**Tabla 10: Propiedades termodinámicas del agua líquida comprimida**

$T$ °C	$v \times 10^3$ m <sup>3</sup> /kg	$u$ kJ/kg	$h$ kJ/kg	$s$ kJ/kg · K	$v \times 10^3$ m <sup>3</sup> /kg	$u$ kJ/kg	$h$ kJ/kg	$s$ kJ/kg · K
$p = 25 \text{ bar} = 2.5 \text{ MPa}$ ( $T_{\text{sat}} = 223.99^\circ\text{C}$ )					$p = 50 \text{ bar} = 5.0 \text{ MPa}$ ( $T_{\text{sat}} = 263.99^\circ\text{C}$ )			
20	1.0006	83.80	86.30	.2961	.9995	83.65	88.65	.2956
40	1.0067	167.25	169.77	.5715	1.0056	166.95	171.97	.5705
80	1.0280	334.29	336.86	1.0737	1.0268	333.72	338.85	1.0720
100	1.0423	418.24	420.85	1.3050	1.0410	417.52	422.72	1.3030
140	1.0784	587.82	590.52	1.7369	1.0768	586.76	592.15	1.7343
180	1.1261	761.16	763.97	2.1375	1.1240	759.63	765.25	2.1341
200	1.1555	849.9	852.8	2.3294	1.1530	848.1	853.9	2.3255
220	1.1898	940.7	943.7	2.5174	1.1866	938.4	944.4	2.5128
Sat.	1.1973	959.1	962.1	2.5546	1.2859	1147.8	1154.2	2.9202
$p = 75 \text{ bar} = 7.5 \text{ MPa}$ ( $T_{\text{sat}} = 290.59^\circ\text{C}$ )					$p = 100 \text{ bar} = 10.0 \text{ MPa}$ ( $T_{\text{sat}} = 311.06^\circ\text{C}$ )			
20	.9984	83.50	90.99	.2950	.9972	83.36	93.33	.2945

**Tabla 3.1.-** Propiedades del agua obtenidas del apéndice de un libro de termodinámica

Como no existe un valor tabulado en el libro para 20 bares, se debe tomar como valor de referencia 25 bares (o 2,5 MPa). La diferencia es apenas apreciable en esta zona de la campana del diagrama T-s. Se puede ver que en la tabla de 50 bares los valores casi no varían a la misma temperatura de entre 40-80°C, mucho menos si la diferencia solo es de 5 bares. Por tanto las propiedades a 25 bares se tomarán como aproximación de valores para 20 bares.

Otro dato a tener en cuenta es que como está el valor exacto de temperatura no aparece, habrá que interpolar entre los valores próximos tabulados, ya que la diferencia de la temperatura si hace variar las propiedades. En este caso, como 60°C se encuentra a la mitad del rango, se puede realizar la media en lugar de realizar la interpolación de ambos valores:

$$\text{Volumen específico: } v(60^\circ\text{C}) = \frac{1,0067 + 1,0280}{2} = 1,01735 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\text{Energía interna específica: } u(60^\circ\text{C}) = \frac{167,25 + 334,29}{2} = 250,77 \text{ KJ}/\text{kg}$$

$$\text{Entalpía específica: } h(60^\circ\text{C}) = \frac{169,77 + 336,86}{2} = 253,32 \text{ KJ}/\text{kg}$$

$$\text{Entropía específica: } s(60^\circ\text{C}) = \frac{0,5715 + 1,0737}{2} = 0,823 \text{ KJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$$



### 3.4. DESCRIPCION DE LA GRASA DEL JAMON

Como se ha comentado, la grasa define las condiciones de operación y diseño de los equipos de la nave. Para la retirada de la grasa se necesita unas determinadas características operacionales y determinados detergentes químicos.

Previamente este detergente elaborado para la propia empresa, es espumado mediante un satélite con una parte de mezcla de agua y detergente. Esta conforma una espuma activa que reblandece y levanta la grasa de la pared, con el fin de facilitar la posterior retirada de la misma usando agua caliente a presión.

Para retirar la grasa tratada, la presión y temperatura no son elegidas al azar. Estos parámetros, aunque no están recogidos de manera teórica, son valorados por expertos en base a su experiencia en el sector:

- *La presión:* debe de ser suficiente para retirar la grasa de manera mecánica. Pero no excesiva, ya que por un lado se sobredimensionarían los equipos y por otro 'rompería' la grasa, esparciéndola y dificultando su retirada. Además un exceso de presión aumentaría los daños a largo de tiempo que se produce el choque del agua en paredes, suelos y maquinaria.
- *La temperatura:* debe de ser lo suficientemente alta para reblandecer la grasa y facilitar su retirada, pero tampoco demasiada para diluirla y acabar esparciendo la grasa en lugar de retirarla. La temperatura optima ronda entre los 50°C y 70°C.



**Imagen 3.15.-** Ejemplo de pared de secadero sucia y con grasa

### 3.5. RESUMEN DE LAS CONDICIONES INICIALES APORTADAS POR LA INSTALACION Y EVOLUCION DEL FLUIDO EN EL PROCESO

En conclusión a los apartados anteriores, se hace necesario el uso de agua caliente a presión para la retirada de grasa e higienización del secadero. Los datos técnicos y teóricos aportados por la instalación, descritos también con anterioridad se recogen en la siguiente tabla:

PARAMETRO	VALOR
Fluido	Agua filtrada y depurada
Presión	≈20 bar
Temperatura	60 °C
Densidad	989 kg/m <sup>3</sup>
Viscosidad (a 60°C)	1,017 m <sup>3</sup> /kg
Energía interna (a 60°C)	250,77 kJ/kg
Entalpia (a 60°C)	253,32 kJ/kg
Entropía (a 60°C)	0,823 kJ/kg K

**Tabla 3.2.-** Resumen de las propiedades del agua a la salida de la bomba

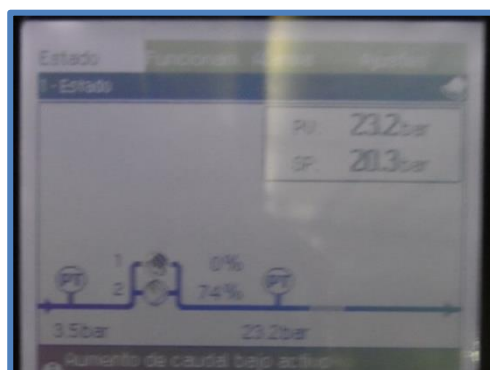
Todas las propiedades del agua cambian desde la entrada en el circuito del fluido hasta la salida. La mayoría varían ligeramente, su variación se puede asumir despreciable, y por estos datos serán tomados como constantes. Pero si hay dos parámetros importantes los cuales hay que estudiar aparte, y son la caída de presión y la temperatura, porque la variación si es notable.

### 3.6. PERDIDA DE CARGA EN EL CIRCUITO INSTALACION

El objetivo de este cálculo es conocer si es certero aproximar la presión que aporta la bomba como 20 bares, hipótesis a la presión que hay en la boquilla de la misma.

Para ello hay que conocer que es importante conocer que en el diseño de la instalación, las bombas se las pone a trabajar a algo más de 20 bares para compensar la pérdida de carga a lo largo del circuito, considerable debido a las grandes dimensiones de la instalación.

**Imagen 3.16.-** La foto de la derecha recoge la presión a la salida de la bomba. El valor es de 23,2 bares, superior a 20 bares, para afrontar la pérdida de carga que sucede en la tubería



En el punto '3.1.3. Red de Tuberías', se recoge la longitud de las tuberías de la instalación hasta el punto más lejano de la instalación, tramo donde la pérdida de carga será mayor. La longitud en este tramo es de 67 metros de tubería de acero protegida con aislante. Todos los tramos de tubería de acero son de 25 mm de diámetro interno. Después mediante el satélite el circuito cambia de la tubería de acero a la manguera. El tramo de la manguera de poliéster tiene diámetro interno 12,5 milímetros.

### PLANTEAMIENTO DEL CÁLCULO. ECUACION DE BERNOULLI

Como bien se ha introducido en este punto, para saber cual es la presión a la entrada de la boquilla, se hace necesario conocer la pérdida de carga o caída de presión que sufre el fluido desde las bombas durante su paso por el circuito. Para esto se debe aplicar la ecuación de Bernoulli al trayecto.

La mecánica de fluidos basa gran parte de su teoría en este principio de Bernoulli. Esta describe el comportamiento de un fluido moviéndose a lo largo de una corriente de agua. Fue expuesto por Daniel Bernoulli en su obra Hidrodinámica (1738). Este principio expresa que en un fluido en régimen de circulación por un conducto cerrado, la energía que posee el fluido permanece constante a lo largo de su recorrido. La ecuación general es (Fuente: Apuntes y Formulario de la asignatura Mecánica de Fluidos de la Universidad Carlos III):

$$\left( p_1 + \rho \frac{V_1^2}{2} + \rho g z_1 \right) - \left( p_2 + \rho \frac{V_2^2}{2} + \rho g z_2 \right) = \rho \frac{V^2}{2} \left[ \frac{L}{D} f + \sum_i K_i \right] + \frac{\dot{W}}{Q}$$

Analizando los términos de la ecuación uno por uno para el caso del cálculo en el circuito se tiene que:

- *Término  $\frac{\dot{W}}{Q}$ :* En este término W es el trabajo realizado por el fluido, y Q el caudal. Este término en este caso se desprecia ya que el fluido no realiza ningún trabajo desde que sale de la bomba hasta la toma de la manguera.
- *La presión a la entrada:* el valor esta medido por un equipo electrónico que controla las bombas. El valor de presión oscila, tras observar los valores, en el rango entre 23,2 y 21,3 bares. El valor medio entre ambos será escogido como el valor de presión de entrada.

$$P_1 = \bar{X}_{\text{PRESION ENTRADA}} = \frac{(23,2 + 21,3)\text{bar}}{2} = 22,25 \text{ bar}$$

- *La presión de salida:* será el dato que debemos calcular, por lo tanto será la incógnita a calcular.

$$P_2 = ?$$

- *Término de la altura hidrodinámica:* Como el equipo de las bombas se encuentra en el falso techo, la altura hidrodinámica a tener en cuenta, será la altura de la nave (12 metros), restándole un metro de la altura de la toma al suelo y otro metro del techo hasta la ubicación de la tubería. Así pues la altura será, es decir una altura de 10 metros.

Hay que tener en cuenta que esta altura no será una restricción que limitara la presión, si no que ayudará a facilitar la salida del fluido, debido a la acción de la gravedad, por tanto no tendremos en cuenta este término para obtener la condición más crítica.

- *La velocidad:* Hay que tener en cuenta en el término de la energía cinética, se puede simplificar gracias a la relación de la ecuación de la continuidad. Por teoría, el caudal debe de mantenerse constante, si no hay fugas a lo largo de la red de tuberías. Así se obtiene que:

$$Q_1 = Q_2$$

$$Q = \text{Caudal} = \text{Velocidad} \cdot \text{Area} \Leftrightarrow \frac{V_1 \pi D_1^2}{4} = \frac{V_2 \pi D_2^2}{4} \rightarrow V_2 = \frac{V_1 \pi D_1^2}{\frac{\pi D_2^2}{4}} = V_1 \frac{D_1^2}{D_2^2}$$

$$V_2 = V_1 \cdot \frac{25 \text{ mm}^2}{12,5 \text{ mm}^2} = V_1 \cdot 4$$

Como conocemos los datos a la entrada, podremos calcular la velocidad de entrada ' $V_1$ ' y junto con relación de diámetros podremos hallar la velocidad a la salida ' $V_2$ '. La velocidad se saca conociendo el caudal. El caudal, medido con un caudalímetro colocado a la salida de la manguera, según el informe anterior mostrado en un apartado anterior, el caudal es de 35 l/min. Cambiando las unidades:

$$Q = 35 \frac{\text{l}}{\text{min}} = 35 \frac{\text{dm}^3}{\text{min}} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ dm}^3} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = 0,0005833 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = Q_1 = Q_2$$

Y como se conoce el diámetro de la tubería a la entrada, y con el dato medido por el operario de mantenimiento con un caudalímetro:

$$Q = V \cdot A \rightarrow V_1 = \frac{0,0005833 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{\frac{\pi \cdot (25\text{mm})^2}{4}} = 1,189 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$V_2 = V_1 \cdot 4 = 4,756 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

- *Perdida de carga:* A la derecha de la igualdad, existen dos términos. Como se ha comentado antes el segundo término se desprecia en este caso. Por otro lado se encuentra el término de pérdida de carga, donde el factor que multiplica el corchete es una densidad y una velocidad genérica, ya que dependiendo del tramo la velocidad y la densidad serán diferentes. La densidad debido a que es un fluido líquido su densidad se puede asumir constante.

El corchete está compuesto por un término de rugosidad y otro de pérdida de carga en componentes, que habrá que estudiar más detenidamente.

$$\Delta P = \rho \frac{V^2}{2} \left[ \frac{L}{D} f + \sum_i K_i \right] + \frac{\dot{W}}{Q}$$

### *CALCULO DE LA PERDIDA DE CARGA EN LOS COMPONENTES DE LA INSTALACION*

El circuito consta desde la salida de las bombas de dos tramos de tuberías, las de la propia de la nave, y la manguera. Debido a la diferente rugosidad de ambos materiales, el cálculo de la pérdida de carga se divide en dos términos.

El primero es el tramo de tubería para acero comercial de diámetro 25 mm y cuya suma en metros son (10m+45m+12m=67m). En esta parte del circuito considerado, existen una serie de componentes por lo que el agua es filtrada y dirigida que contribuirán al aumento de la pérdida de carga, cada uno con su valor característico. Estos componentes a lo largo del tramo calculado son:

- 3 uniones de tuberías en codo a 90°.
- 3 uniones de tuberías en T.
- Todas las tuberías están unidas mediante roscas y teflón
- Dos válvulas de globo a lo largo del trayecto
- Además se tiene dos válvulas de globo a lo largo del trayecto.

La segunda parte de este circuito empieza en el satélite donde se acopla la manguera. La mencionada manguera consta de 25 metros esta constituida de un plástico termoestable de PVC por fuera. El interior tiene un diámetro de 12 mm con acabado muy liso de fibras de poliestireno. En este tramo los elementos que producen pérdida de carga son:

- Contracción brusca en el satélite, en el cambio de tubería – manguera. La pérdida se debe de asociar al diámetro menor, como se establece en la teoría del cálculo de la pérdida de carga.

- Además se tienen una valvula antirretorno y otra de compuerta a ambos extremos de la manguera.

A continuación se muestra una tabla, con el valor típico del coeficiente de pérdidas en diferentes elementos en función del diámetro. Para distinguir los dos tramos que se deben calcular por separado, la parte de tuberías de acero del circuito tienen el subíndice 1, mientras que los que pertenecen al tramo de la manguera, el 2. (**Fuente:** Formulario de la asignatura Ingeniería Fluido-mecánica de la Universidad Carlos III).

COMPONENTE	NOMBRE	DIMENSION O NUMERO	DIAMETRO	METODO UNION	VALOR PERDIDA
<b>Tuberia de acero comercial</b>	$L_1$	67 metros	2,5 cm	-	$f_1$
<b>Electroválvula de compuerta</b>	$K_{elec-comp1}$	1 unidad	2,5 cm	Roscado	0,24
<b>Unión Codo Suave</b>	$K_{codo1}$	3 unidades	2,5 cm	Acoplado	0,40
<b>Unión T Fujo Directo</b>	$K_{t1}$	3 unidades	2,5 cm	Acoplado	0,24
<b>Válvula Globo</b>	$K_{globo1}$	2 unidades	2,5 cm	Roscado	8,2
<b>Manguera plástico lisa</b>	$L_2$	25 metros	1,2 cm	-	$f_2$
<b>Contracción Brusca</b>	$K_{contrac2}$	1 unidad	1,2 cm	Roscado	-
<b>Válvula Antirretorno</b>	$K_{anti-retorno2}$	1 unidad	1,2 cm	Roscado	5,1
<b>Válvula Compuerta</b>	$K_{comp2}$	1 unidad	1,2 cm	Roscado	0,3

**Tabla 3.3.-** Componentes del circuito y su pérdida de carga asociada separadas en el tramo 1 y 2

La mayoría de los valores se obtienen de manera directa ya que están tabulados, exceptuando la contracción brusca y los dos factores de fricción (f). El valor del coeficiente de pérdidas de la contracción brusca no viene tabulado, pero se calcula de manera sencilla con la siguiente fórmula, que aparece también en el formulario:

$$K_{contrac2} = 0,42 \cdot \left(1 - \frac{D_2^2}{D_1^2}\right) = 0,42 \cdot \left(1 - \frac{(12 \text{ mm})_2^2}{(25 \text{ mm})_1^2}\right) = 0,32$$

Los dos factores de fricción dependen de la rugosidad del material, diámetro y velocidad de las tuberías. Este cálculo es más elaborado y se debe realizar aparte. Aunque para conocer este parámetro hay varios métodos, uno de los mas sencillos y sin mucho volumen de cálculo, es hallarlo mediante el diagrama de Moody.

Para poder usar este diagrama es necesario entrar con dos datos. El primero de ellos es la rugosidad relativa, y el segundo, el número de Reynolds.

Para el cálculo de ambos factores de fricción es necesario conocer la rugosidad del acero comercial y el poliéster del interior de la manguera. Aunque la manguera por fuera es de PVC, lo importante es el material en contacto con el fluido, el poliéster. Esta se obtiene de la tabla que proporciona un fabricante de mangueras. (Fuente: <http://www.miliarium.com/Prontuario/MedioAmbiente/Aguas/PerdidaCarga.asp>):

RUGOSIDAD ABSOLUTA DE MATERIALES			
Material	$\epsilon$ (mm)	Material	$\epsilon$ (mm)
Plástico (PE, PVC)	0,0015	Fundición asfaltada	0,06-0,18
Poliéster reforzado de fibra	0,01	Fundición	0,12-0,60
Tubos estirados de acero	0,0024	Acero comercial y soldado	0,03-0,09
Tubos de latón o cobre	0,0015	Hierro forjado	0,03-0,09
Fundición revestida de cemento	0,0024	Hierro galvanizado	0,06-0,24
Fundición con revestimiento bituminoso	0,0024	Madera	0,18-0,90
Fundición centrífuga	0,003	Hormigón	0,3-3,0

**Tabla 3.4.-** Rugosidad absoluta de los materiales obtenida de Milliarium, empresa que ofrece cursos de ingeniería civil y medio ambiente

Por tanto de la siguiente tabla escogeremos como rugosidad:

- $f_1 \rightarrow \epsilon_1 = 0,04 \text{ mm}$ : ya que es el recomendado para tuberías de gama media-alta.
- $f_2 \rightarrow \epsilon_2 = 0,01 \text{ mm}$ : único valor característico para este material.

A partir de la rugosidad absoluta podemos calcular un parámetro necesario para el cálculo del factor de fricción, llamado rugosidad relativa. Este parámetro se obtiene de dividir la rugosidad entre el diámetro de la tubería. Realizando el cálculo:

$$\text{Rugosidad relativa 1} = \epsilon_{r1} = \epsilon_1 / D_1 = 0,04 \text{ mm} / 25 \text{ mm} = 0,0016$$

$$\text{Rugosidad relativa 2} = \epsilon_{r2} = \epsilon_2 / D_2 = 0,01 \text{ mm} / 12 \text{ mm} = 0,0008$$

El segundo parámetro para poder entrar en la grafica es el numero de Reynolds ( $Re_D = \frac{\rho V D}{\mu}$ ). El número de Reynolds es un número adimensional muy usado en la ingeniería de fluidos. Suele usarse para predecir el régimen de un fluido laminar-transitorio-turbulento. Los datos necesarios para el cálculo son la velocidad y el diámetro en cada tramo:

$$D_1 = 25\text{mm}, V_1 = 1,189 \text{ m/s}$$

$$D_2 = 12\text{mm}, V_2 = 4,756 \text{ m/s}$$

Y los datos del fluido necesarios para el cálculo, son la densidad y la viscosidad dinámica. La densidad se halló anteriormente (ver punto 3.3). Por otro lado la viscosidad, en los datos anteriores del libro no venía tabulada. Pero sabiendo que el fluido es agua caliente a 60°C, se puede ir a la siguiente tabla donde se recoge esta propiedad (Fuente: <http://www.miliarium.com/Paginas/Prontuario/Tablas/Aguas/PropiedadesFisicasAgua.htm>):

PROPIEDADES FÍSICAS DEL AGUA							
PROPIEDADES FÍSICAS DEL AGUA							
Temperatura (°C)	Peso específico (kN/m³)	Densidad (kg/m³)	Módulo de elasticidad (kN/m²)	Viscosidad dinámica (N·s/m²)	Viscosidad cinemática (m²/s)	Tensión superficial (N/m)	Presión de vapor (kN/m²)
0	9,805	999,8	$1,98 \cdot 10^6$	$1,781 \cdot 10^{-3}$	$1,785 \cdot 10^{-6}$	0,0765	0,61
5	9,807	1000,0	$2,05 \cdot 10^6$	$1,518 \cdot 10^{-3}$	$1,519 \cdot 10^{-6}$	0,0749	0,87
10	9,804	999,7	$2,10 \cdot 10^6$	$1,307 \cdot 10^{-3}$	$1,306 \cdot 10^{-6}$	0,0742	1,23
15	9,798	999,1	$2,15 \cdot 10^6$	$1,139 \cdot 10^{-3}$	$1,139 \cdot 10^{-6}$	0,0735	1,70
20	9,789	998,2	$2,17 \cdot 10^6$	$1,102 \cdot 10^{-3}$	$1,003 \cdot 10^{-6}$	0,0728	2,34
25	9,777	997,0	$2,22 \cdot 10^6$	$0,890 \cdot 10^{-3}$	$0,893 \cdot 10^{-6}$	0,0720	3,17
30	9,764	995,7	$2,25 \cdot 10^6$	$0,708 \cdot 10^{-3}$	$0,800 \cdot 10^{-6}$	0,0712	4,24
40	9,730	992,2	$2,28 \cdot 10^6$	$0,653 \cdot 10^{-3}$	$0,658 \cdot 10^{-6}$	0,0696	7,38
50	9,689	988,0	$2,29 \cdot 10^6$	$0,547 \cdot 10^{-3}$	$0,553 \cdot 10^{-6}$	0,0679	12,33
60	9,642	983,2	$2,28 \cdot 10^6$	$0,466 \cdot 10^{-3}$	$0,474 \cdot 10^{-6}$	0,0662	19,92
70	9,589	977,8	$2,25 \cdot 10^6$	$0,404 \cdot 10^{-3}$	$0,413 \cdot 10^{-6}$	0,0644	31,16
80	9,530	971,8	$2,20 \cdot 10^6$	$0,354 \cdot 10^{-3}$	$0,364 \cdot 10^{-6}$	0,0626	47,34
90	9,466	965,3	$2,14 \cdot 10^6$	$0,315 \cdot 10^{-3}$	$0,326 \cdot 10^{-6}$	0,0608	70,10

**Tabla 3.5.-** Tabla del agua usada para obtener el valor de la viscosidad dinámica del agua

El último parámetro necesario, es la densidad. Este ya había sido hallado en el apartado 3.3., sacado del libro de Fundamentos de la termodinámica técnica de Moran:

$$\rho_{\text{agua a } 60^\circ\text{C y } 20 \text{ bar}} = 1/v = 1/1,01017 \cdot 10^{-3} = 989 \text{ kg/m}^3$$

Una vez hallados todos los datos necesarios para calcular el valor del Reynolds:

$$Re_{D1} = \frac{\rho V_1 D_1}{\mu} = \frac{989 \text{ kg/m}^3 \cdot 1,189 \text{ m/s} \cdot 0,025 \text{ m}}{0,46 \cdot 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2} = 63908$$

$$Re_{D2} = \frac{\rho V_2 D_2}{\mu} = \frac{989 \text{ kg/m}^3 \cdot 4,756 \text{ m/s} \cdot 0,012 \text{ m}}{0,46 \cdot 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2} = 112704$$



El último paso para hallar el valor del coeficiente de fricción, es entrar en el diagrama de Moody. El primer paso es identificar si el flujo es turbulento, que es así siempre y cuando el valor del número de Reynolds sea mayor de 20000. Como en ambos casos el valor es superior, en ambos casos se dispone de fluido en régimen turbulento.

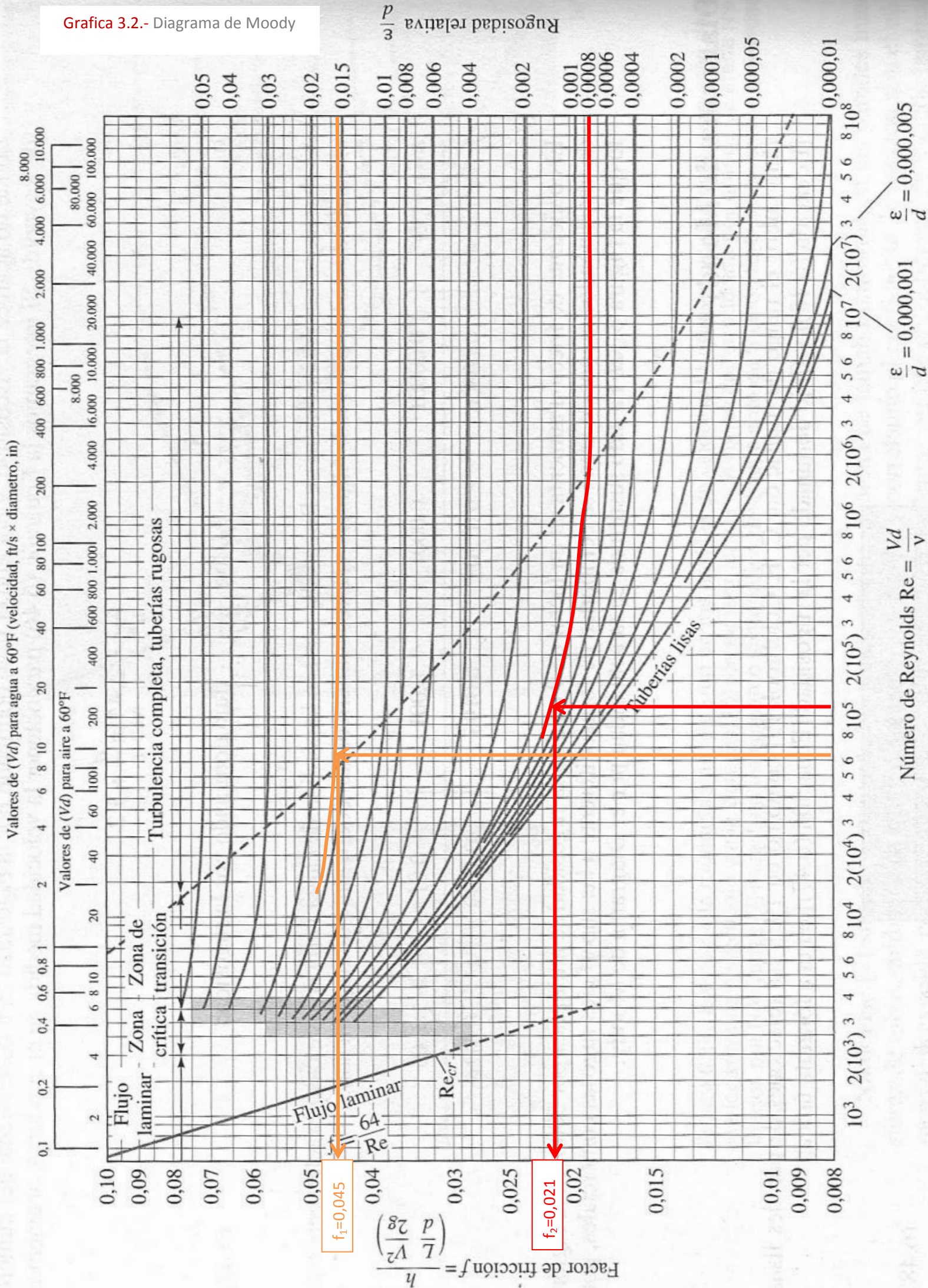
La gráfica es de doble entrada. Para ello, en la parte de abajo de la gráfica están tabulados los valores del número de Reynolds, que será el primer dato de entrada. Por el valor obtenido no hay nada mas que trazar una recta vertical. Para el segundo valor, a la derecha de la gráfica estan los valores de rugosidad relativa. Una vez se identifique el valor de rugosidad del tramo entre los tabulados, se sigue por la curva característica de ese valor de rugosidad hasta cortar con la recta horizontal del número de Reynolds. Si los valores no son exactos, no hay nada más que trazar paralelas a la curvas o las rectas existentes entre los valores más cercanos de la gráfica.

Por último, una vez obtenido ese punto de intersección, de manera horizontal hay que desplazarse hacia la izquierda, donde se encuentran tabulados los valores del coeficiente de fricción.

En la siguiente hoja se muestra el diagrama con el proceso seguido para la obtención de los coeficientes de fricción, descrito anteriormente. En rojo esta el proceso seguido para la tubería de acero y en naranja la de poliéster de la manguera.

(Fuente: Formulario de la Asignatura de Ingeniería de Fluidos de la Universidad Carlos III):

Grafica 3.2.- Diagrama de Moody



En resumen, las pérdidas que se produce en cada componente son:

COMPONENTE	NOMBRE	DIMENSION O NUMERO	DIAMETRO	METODO UNION	VALOR PERDIDA
Tubería de acero comercial	$L_1$	67 metros	2,5 cm	-	$f_1 = 0,045$
Electroválvula de compuerta	$K_{elec-comp1}$	1 unidad	2,5 cm	Roscado	0,24
Unión Codo Suave	$K_{codo1}$	3 unidades	2,5 cm	Acoplado	0,40
Unión T Fujo Directo	$K_{t1}$	3 unidades	2,5 cm	Acoplado	0,24
Válvula Globo	$K_{globo1}$	2 unidades	2,5 cm	Roscado	8,2
Manguera plástico lisa	$L_2$	25 metros	1,2 cm	-	$f_2 = 0,021$
Contracción Brusca	$K_{contrac2}$	1 unidad	1,2 cm	Roscado	-
Válvula Antiretorno	$K_{anti-retorno2}$	1 unidad	1,2 cm	Roscado	5,1
Válvula Compuerta	$K_{comp2}$	1 unidad	1,2 cm	Roscado	0,3

**Tabla 3.6.-** Tabla con las pérdidas que se producen en cada componente completa

### CÁLCULO DEL TÉRMINO DE LA PERDIDA DE CARGA

El término de pérdida de carga como se ha demostrado en el apartado anterior, se define como:

$$\left( p_1 + \rho \frac{V_1^2}{2} + \rho g z_1 \right) - \left( p_2 + \rho \frac{V_2^2}{2} + \rho g z_2 \right) = \rho \frac{V^2}{2} \left[ \frac{L}{D} f + \sum_i K_i \right] = \Delta P$$

Esta a su vez, se divide en los dos tramos, la tubería de acero y la manguera, cada una con su longitud y velocidad:

$$\Delta P = \rho \frac{V^2}{2} \left[ \frac{L}{D} f + \sum_i K_i \right] = \rho \frac{V_1^2}{2} \left[ \frac{L_1}{D_1} f_1 + \sum_i K_{1i} \right] + \rho \frac{V_2^2}{2} \left[ \frac{L_2}{D_2} f_2 + \sum_i K_{2i} \right]$$

Por tanto caracterizando la ecuación a los parámetros que se tiene:

$$\Delta P_1 = \rho \frac{V_1^2}{2} \left[ \frac{L_1}{D_1} f_1 + K_{elec-comp1} + 3 \cdot K_{codo} + 3 \cdot K_t + K_{globo} \right]$$

$$\Delta P_2 = \rho \frac{V_2^2}{2} \left[ \frac{L_2}{D_2} f_2 + K_{comp2} + K_{antiretorno} + K_{contrac2} \right]$$

Dando valores se obtiene:

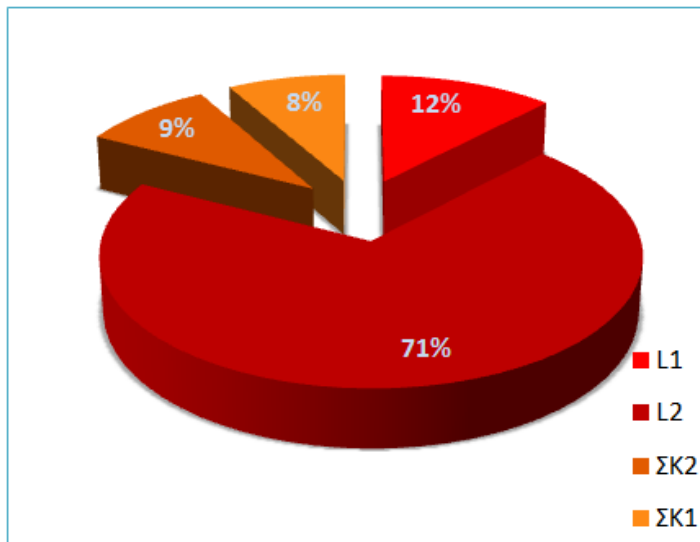
$$\Delta P_1 = 989 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \frac{(1,189 \text{ m/s})^2}{2} \left[ \frac{67 \text{ m}}{0,025 \text{ m}} \cdot 0,045 + 0,24 + 3 \cdot 0,40 + 3 \cdot 24 + 8,2 \right]$$

$$\Delta P_1 = 1413,83 \text{ Pa}$$

$$\Delta P_2 = 989 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \frac{(4,756 \text{ m/s})^2}{2} \left[ \frac{25 \text{ m}}{0,012 \text{ m}} \cdot 0,021 + 0,323 + 5,1 + 0,3 \right]$$

$$\Delta P_2 = 5533,73 \text{ Pa}$$

El siguiente gráfico muestra una comparación de donde son mayores pérdidas de carga:



**Grafico 3.3.-** Pérdida de carga en los dos tramos y por la suma de los diferentes componentes de cada tramo, calculados de la ecuación cada término por separado

Las mayores pérdidas se dan en los tramos rectos de las tuberías. Es lógico debido a las grandes distancias a salvar. Por otro lado, la mayor pérdida se da en la manguera o tubería pequeña. Esto se puede deber a que el aumento de velocidad, junto con la disminución de la sección, hace que aumente la turbulencia que se genera en ella (como se puede observar en los números de Reynolds). El aumento de la turbulencia junto con el estrechamiento puede ser el motivo por el cuál aumente la caída de presión.

### *PRESIÓN FINAL A LA SALIDA DE LA MANGUERA*

Si de la ecuación de Bernoulli, se despeja la presión de salida o P2, para conseguir hallar la incógnita que se busca:

$$\left(p_1 + \rho \frac{V_1^2}{2} + \rho g z_1\right) - \left(p_2 + \rho \frac{V_2^2}{2} + \rho g z_2\right) = \Delta P$$

E introduciendo las simplificaciones mencionadas en los apartados anteriores:

$$V_2 = V_1 \cdot \frac{25 \text{ mm}^2}{12,5 \text{ mm}^2} = V_1 \cdot 4, \quad V_1 = 1,189 \text{ m/s}$$

$$P_1 = \bar{X}_{\text{PRESION ENTRADA}} = \frac{(23,2 + 21,3) \text{ bar}}{2} = 22,25 \text{ bar}$$

$P_2 = ?$

Por tanto, despejando la presión P2:

$$(p_1 - p_2) + \rho \frac{V_1^2 - V_2^2}{2} = \Delta P$$

$$(p_2 - p_1) = \rho \frac{V_1^2 - V_2^2}{2} - \Delta P$$

$$p_2 = p_1 + \rho \frac{V_1^2 - V_2^2}{2} - \Delta P$$

Dando valores a los parámetros:

$$p_2(\text{Pa}) = p_1 + 989 \cdot \frac{1,189^2 - (4 \cdot 1,189)^2}{2} - (1413 + 5534)$$

$$p_2(\text{Pa}) = 225000 - 10486,27 - 1413 - 5534 = 207566,73 \text{ Pa} = 20,76 \text{ bar}$$

Así pues, tras esta aproximación teórica, por el camino más restrictivo en cuanto a pérdida de carga se refiere, el valor a la boquilla de manguera si cumple que a la salida de la boquilla hay aproximadamente 20 bares, por tanto la hipótesis es aceptable.

### 3.7. PERDIDA DE CARGA EN LA BOQUILLA.

Siguiendo con el mismo proceso de cálculo para la pérdida de carga en el circuito, primero planteamos la ecuación de Bernoulli.

$$\left(p_1 + \rho \frac{V_1^2}{2} + \rho g z_1\right) - \left(p_2 + \rho \frac{V_2^2}{2} + \rho g z_2\right) = \rho \frac{V^2}{2} \left[ \frac{L}{D} f + \sum_i K_i \right] + \frac{\dot{W}}{Q} = \Delta P$$

Después se debe simplificar y caracterizar al cálculo de la pérdida de carga de la boquilla:

- *Término  $\frac{\dot{W}}{Q}$ :* En este término W es el trabajo realizado por el fluido, y Q el caudal. Este término en este caso se desprecia ya que el fluido no realiza ningún trabajo desde que sale de la manguera, hasta que sale por el orificio de salida.
- *La presión a la entrada:* el valor está calculado en el apartado anterior, y viene dado por la pérdida de carga

$$P_1 = 20,76 \text{ bar}$$

- *La presión de salida:* será el dato que debemos calcular, por lo tanto será la incógnita a calcular.

$$P_2 = ?$$

- *Término de la altura hidrodinámica:* Como la longitud del terminal es muy pequeña (66 mm), se despreciara el término de la altura. Además la utilización de la boquilla la mayor parte del tiempo será horizontal, y en el caso de que su uso sea en vertical la gravedad no afectará de manera significativa a la salida de agua.

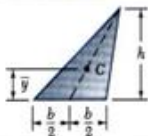
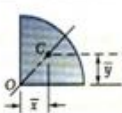
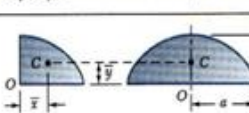
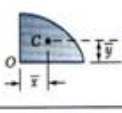
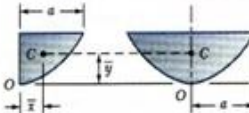
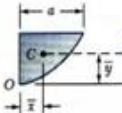
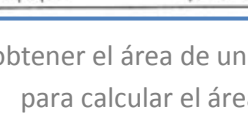
$$z_1 \cong z_2 \\ \rho g z_1 - \rho g z_2 = \rho g (z_1 - z_2) \rightarrow \rho g \cdot 0 = 0$$

- *La velocidad:* Por teoría de la ecuación de la continuidad, el caudal debe de mantenerse constante si no hay fugas o ramales a lo largo de la tubería. Así se obtiene que:

$$Q_1 = Q_2 \\ Q = \text{Caudal} = \text{Velocidad} \cdot \text{Area} \leftrightarrow \frac{V_1 \pi D_1^2}{4} = \frac{V_2 \pi D_2^2}{4} \rightarrow V_2 = \frac{V_1 \cdot \frac{\pi D_1^2}{4}}{\text{Area}_{\text{orificio salida}}}$$



Como el área de salida son dos arcos de circunferencia, con forma parecida a la de una elipse, el área se aproximará a esta forma para poder relacionar las velocidades. Más adelante se comprobará la validez de esta hipótesis mediante la comparación de ambas superficies con el ordenador, y se verá que el valor es muy similar. El área es obtenida aplicando la siguiente tabla: (Fuente: Libro 'Mecánica vectorial para ingenieros', editorial Mc Graw Hill).

Shape		$\bar{x}$	$\bar{y}$	Area
Triangular area			$\frac{h}{3}$	$\frac{bh}{2}$
Quarter-circular area		$\frac{4r}{3\pi}$	$\frac{4r}{3\pi}$	$\frac{\pi r^2}{4}$
Semicircular area		0	$\frac{4r}{3\pi}$	$\frac{\pi r^2}{2}$
Quarter-elliptical area		$\frac{4a}{3\pi}$	$\frac{4b}{3\pi}$	$\frac{\pi ab}{4}$
Semielliptical area		0	$\frac{4b}{3\pi}$	$\frac{\pi ab}{2}$
Semiparabolic area		$\frac{3a}{8}$	$\frac{3h}{5}$	$\frac{2ah}{3}$
Parabolic area		0	$\frac{3h}{5}$	$\frac{4ah}{3}$

**Tabla 3.7.-** Tabla para obtener el área de un elemento parabólico, que se usará para calcular el área de salida

$$\text{Area}_{\text{orificio salida}} = 4 \cdot \frac{2}{3} \cdot b \cdot h = 4 \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{3,8\text{mm}}{2} \cdot \frac{4,8\text{mm}}{2} = 12,16 \text{ mm}^2$$

$$\text{Area}_{\text{orificio entrada}} = \frac{\pi D_1^2}{4} = \pi \cdot \frac{12,5 \text{ mm}^2}{4} = 122,72 \text{ mm}^2$$

$$V_{\text{salida}} = V_{\text{entrada}} \cdot \frac{122,72 \text{ mm}^2}{12,16 \text{ mm}^2} = V_{\text{entrada}} \cdot 10,1$$

Además es necesario hallar el valor de la velocidad en el tramo intermedio del interior de la boquilla, para el cálculo final de la pérdida de carga.

$$V_{\text{intermedia}} = V_{\text{entrada}} \frac{\frac{\pi D_{\text{entrada}}^2}{4}}{\frac{\pi D_{\text{intermedia}}^2}{4}} = V_{\text{entrada}} \frac{D_{\text{entrada}}^2}{D_{\text{intermedia}}^2} = 4,756 \cdot \frac{12,5 \text{ mm}^2}{10 \text{ mm}^2}$$

$$V_{\text{intermedia}} = 7,43 \text{ m/s}$$

El caudal se mantiene constante a lo largo de todo el circuito y su valor es de 35 l/min. Cambiando las unidades para poder calcular la velocidad:

$$Q = 35 \frac{\text{l}}{\text{min}} = 35 \frac{\text{dm}^3}{\text{min}} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ dm}^3} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = 0,0005833 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = Q_1 = Q_2$$

Y como se conoce el diámetro de la boquilla a la entrada, y con el dato medido por el operario de mantenimiento con un caudalímetro:

$$Q = V \cdot A \rightarrow V_1 = \frac{0,0005833 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{\frac{\pi \cdot (12,5 \text{ mm})^2}{4}} = 4,756 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$V_2 = V_1 \cdot 10,01 = 47,61 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Se observa que la velocidad de entrada coincide con la de salida del apartado anterior, como es lógico debido a que el fluido pasa de la manguera a la boquilla sin pérdida de carga notable debido al acople normalizado. El valor de salida calculado en el punto de salida no es el definitivo en la salida. Lo que ocurrirá es que cuando el fluido se ponga en contacto con la presión atmosférica se creará un gradiente de presión que transformará la energía potencial en cinética y acelerará el fluido.

- *Pérdida de carga:* se compone de dos términos, uno es el factor de fricción del material. El término que hace referencia a pérdida de carga de los componentes.

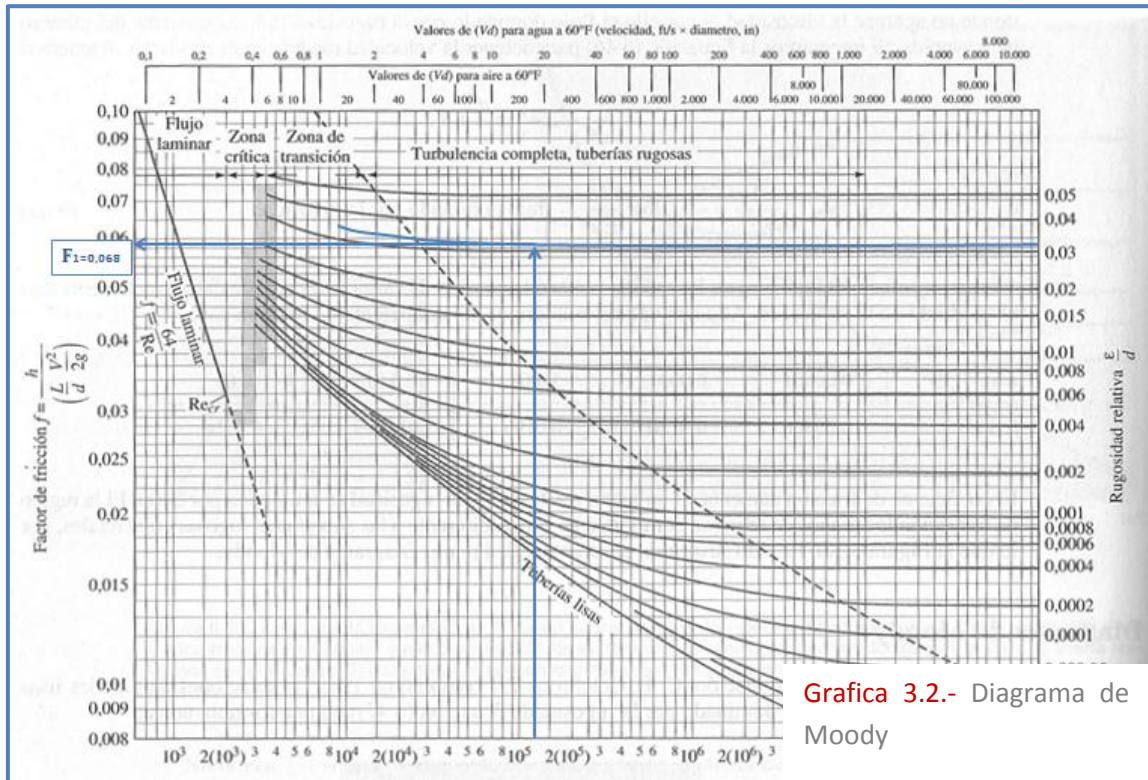
Para el factor de fricción es necesario obtener el dato de la rugosidad relativa, y para ello primero hay que conocer la rugosidad absoluta del material. Este se puede sacar de la tabla 3.4, donde la rugosidad del material para el acero es 0,004. El dato de la rugosidad equivalente se obtiene de dividir la rugosidad de material, entre el diámetro.

$$\text{Rugosidad relativa} = \varepsilon_r = \varepsilon / D = 0,04 \text{ mm} / 12,5 \text{ mm} = 0,0032$$

El siguiente paso es calcular el número de Reynolds del fluido dentro de la boquilla. Como hay tres diámetros, habrá tres velocidades, pero por continuidad al ser relación la velocidad del diámetro el número de Reynolds se mantiene constante en los tres tramos.

$$\text{Re}_D = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{989 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 4,756 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,0125 \text{ m}}{0,46 \cdot 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{s} / \text{m}^2} = 127817$$

Ahora ya se puede obtener el factor de fricción con la rugosidad relativa y el número de Reynolds del flujo del interior del terminal.



Una vez hallado el valor de coeficiente de fricción, queda hallar la pérdida de carga producida en el circuito, que serán dos factores de contracciones bruscas y el factor de entrada del cambio manguera boquilla, que se supondrá igual a 1 debido a mismo diámetro y a la unión normalizada. La fórmula de contracciones bruscas es la misma que la usada en el apartado anterior:

$$K_{\text{entrada}} = 1$$

$$K_{\text{contraccion1}} = 0,42 \cdot \left(1 - \frac{D_2^2}{D_1^2}\right) = 0,42 \cdot \left(1 - \frac{(10 \text{ mm})^2}{(12,5 \text{ mm})^2}\right) = 0,15$$

$$K_{\text{contracion2}} = 0,42 \cdot \left(1 - \frac{D_2^2}{D_1^2}\right) = 0,42 \cdot \left(1 - \frac{(8 \text{ mm})^2}{(10 \text{ mm})^2}\right) = 0,15$$

Despejando la ecuación de la pérdida de carga:

$$\Delta P = \rho \frac{V^2}{2} \left[ \frac{L}{D} f + \sum_i K_i \right] = \Delta P_{\text{entrada}} + \Delta P_{\text{intermedio}} + \Delta P_{\text{salida}}$$

$$\Delta P_{\text{entrada}} = 989 \text{ kg/m}^3 \frac{(4,756 \text{ m/s})^2}{2} \left[ \frac{0,025 \text{ m}}{0,012 \text{ m}} \cdot 0,032 + 1 \right] = 11.931 \text{ Pa}$$

$$\Delta P_{\text{entrada}} = 989 \text{ kg/m}^3 \frac{(7,43 \text{ m/s})^2}{2} \left[ \frac{0,029 \text{ m}}{0,010 \text{ m}} \cdot 0,032 + 0,15 \right] = 6.628 \text{ Pa}$$

$$\Delta P_{\text{entrada}} = 989 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \frac{(47,61 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2}{2} \left[ \frac{0,009 \text{ m}}{0,008 \text{ m}} \cdot 0,032 + 0,15 \right] = 208.485 \text{ Pa}$$

La pérdida de carga total que se produce en la boquilla es de:

$$\Delta P = \Delta P_{\text{entrada}} + \Delta P_{\text{intermedio}} + \Delta P_{\text{salida}} = 208.485 + 6.628 + 11.931$$

$$\Delta P = 2,27 \text{ bares}$$

La pérdida de presión que sufre el fluido es de 2,27 bares. La mayor pérdida se genera en el último tramo, debido a la estrechez del orificio y la gran velocidad del fluido, lo que incrementa la turbulencia y la disipación de energía por efectos viscosos en el agua.

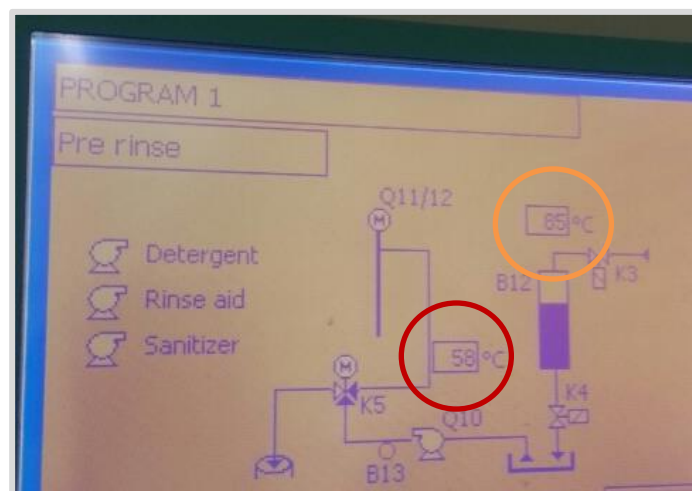
### 3.8. CAIDA DE LA TEMPERATURA EN EL LA RED DE TUBERIAS

La caída de temperatura es necesaria de conocer, ya que para el fácil retiro de la grasa la temperatura se debe de encontrar entre 70°C y 50°C y por tanto se debe comprobar que la temperatura a la salida está en el rango. Es de esperar que la mayor caída de temperatura suceda en el tramo más largo, por la propia mecánica de difusión del calor en flujo interno por convección.

La tubería está conformada por tres partes. La parte interior de la tubería es de acero comercial, de 25 mm de diámetro. El grosor es de 5 milímetros debido a la presión y el calor a la que está sometida. Esta tubería está recubierta por una espuma altamente aislante de 6 centímetros de espesor, y esta espuma esta a su vez protegida por un plástico cromado. Este aislante permite que la temperatura media de la superficie del tubo no decaiga de sobremanera.

El equipo de mantenimiento de la nave asegura una temperatura mínima a la salida de aproximadamente 60°C. Por tanto es factible asumir que la temperatura a la toma de agua es esa. Además se puede comprobar esta hipótesis en la siguiente imagen del centro de control.

**Extracto de la Imagen 3.7.-** Se puede ver el valor de la temperatura en la caldera y en las tomas después del circuito



Se puede ver en la imagen superior, que el agua por la caldera sale a 85°C y en la toma el agua sale con valor de 58°C en ese instante. En definitiva, se deduce que la pérdida de temperatura ronda los 30° desde la caldera hasta el punto de toma. Esa es la temperatura en la toma, además se producirá una caída de temperatura en la manguera. Por ello se eleva la temperatura en la toma por encima de los 50°C, para garantizar la temperatura correcta de operación para la limpieza de la grasa.

### 3.9. PARAMETROS QUE CARACTERISTICOS DE UNA BOQUILLA

#### 3.9.1. DESCRIPCIÓN DE LAS PARTES DE UNA BOQUILLA

- *Orificio de entrada:* Es la zona por la cual se transmite el fluido de la manguera a la boquilla. El diámetro a escoger para el orificio de entrada suele ser el mismo que el usado para la manguera con el fin de minimizar la pérdida de carga, evitar que en el anclaje manguera-boquilla se produzcan esfuerzos elevados y garantizar la estanqueidad.
- *Orificio de salida:* Hace referencia a la zona por la cual el fluido, tras pasar por el interior de la boquilla, es obligado a salir por un diámetro menor, incrementando la velocidad. La forma de este agujero debe ser estudiado, ya que es el parámetro más importante y que proporciona las características del chorro. Condiciona también el caudal y la velocidad que el fluido tomará a la salida.
- *Zona interior:* La zona interior está en contacto directo con el fluido. Se puede tratar a efectos de la mecánica de fluidos como una tubería corta. La importancia de esta zona la tiene en intentar minimizar la pérdida de presión que se produce en la fricción del fluido con la pared de la misma, así como posibles cambios de diámetro o sección que estas tengan.

Por otro lado se hace necesario el empleo de un material que sea resistente a la corrosión y oxidación, que puede llegar ser producido por el agua. De esta zona lo más importante es minimizar la pérdida de carga en las paredes, ya que quita presión al fluido disminuyendo la velocidad de salida. La boquilla actual está conformada por tres piezas mecanizadas por separado y unidas mediante dos roscas. Las formas hexagonales del cuerpo son necesarias para enroscar las partes de la boquilla con un buen apriete. Además es importante para tener un punto de anclaje en caso de que la boquilla no se pudiera separar fácilmente de la manguera.

- *Zona exterior:* La zona exterior viene condicionada por tres parámetros importantes. El primero que condiciona el diseño es el material, que debe de ser capaz de resistir a los golpes y el desgaste. El segundo que condiciona la forma, es el método de fabricación por el cual se lleva a cabo.

Por último, un gran condicionante es el método de unión a la manguera, que suele ser un parámetro normalizado y para este caso son 12 mm de diámetro de rosca métrica. Este parámetro está determinado por la manguera, debido a que no se puede usar cualquier manguera para su uso en la limpieza y los anclajes suelen ser normalizados.

### 3.9.2. RELACION ENTRE EL ORIFICIO DE ENTRADA Y SALIDA

Para sacar la relación existente entre los orificios comentados en el apartado anterior, se usará la ecuación de Bernoulli. A partir de esta ecuación se llegará a deducir la relación entre las velocidades y el área de los orificios de entrada y salida.

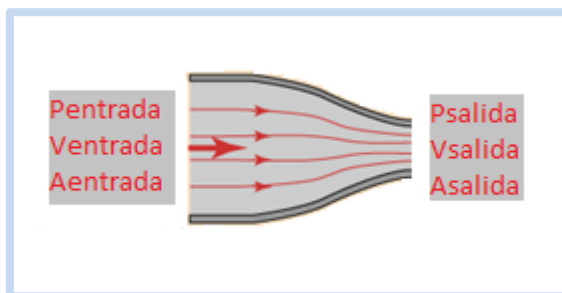
La boquilla, como en los apartados anteriores en el cálculo de la pérdida de carga, se estudia como una tubería. En este caso, se busca sacar una relación entre las áreas para relacionar que ocurre variando el área de salida. Planteando dicha ecuación de Bernoulli, donde 1 es la entrada y 2 es la salida de la boquilla, la ecuación queda:

$$\left(p_e + \rho \frac{V_e^2}{2} + \rho g z_e\right) - \left(p_s + \rho \frac{V_s^2}{2} + \rho g z_s\right) = \rho \frac{V^2}{2} \left[ \frac{L}{D} f + \sum_i K_i \right] + \frac{\dot{W}}{Q}$$

Si a la derecha de la igualdad, se desprecia el trabajo realizado por el fluido  $\left[\frac{\dot{W}}{Q} = 0\right]$  y con el otro término se realiza un cambio de variable con la pérdida de carga  $\left[\rho \frac{V^2}{2} \left[ \frac{L}{D} f + \sum_i K_i \right] = \Delta p\right]$ . Finalmente la ecuación queda como:

$$\left(p_e + \rho \frac{V_e^2}{2} + \rho g z_e\right) - \left(p_s + \rho \frac{V_s^2}{2} + \rho g z_s\right) = \Delta p \text{ (Ecuacion 1)}$$

Por otro lado, estudiando la ecuación de continuidad para este caso:



**Imagen 3.17.-** Imagen de los parámetros que caracterizan el paso de un fluido por un tramo de contracción

Del dibujo podemos observar que a la entrada tenemos 6 variables, que son el área de sección, presión y velocidad, que difieren a la entrada y la salida. La ecuación de continuidad, establece que el caudal debe de ser el mismo, ya que no se puede acumular dentro de la tubería boquilla y no hay pérdidas de flujo ni fugas.

Por tanto imponiendo esta condición:

$$\left\{ \begin{array}{l} Q(\text{caudal}) = A(\text{area}) \cdot v(\text{velocidad}) \\ Q_{\text{entrada}} = Q_{\text{salida}} \end{array} \right\} \rightarrow A_{\text{entrada}} V_{\text{entrada}} = A_{\text{salida}} V_{\text{salida}}$$



Despejando de esta ecuación la velocidad de entrada:

$$v_{\text{entrada}} = \frac{A_{\text{salida}}}{A_{\text{entrada}}} v_{\text{salida}} = \frac{A_s}{A_e} v_s \text{ (Ecuación 2)}$$

Suponiendo despreciable el término del potencial gravitacional debido a que la altura entre ambos puntos es casi el mismo y al restarse esta componente desaparece de la fórmula de la ecuación 1 ( $z_e \cong z_s$ ).

$$\left( P_e + \rho \frac{v_e^2}{2} + \rho g z_e \right) - \left( P_s + \rho \frac{v_s^2}{2} + \rho g z_s \right) = \Delta p$$

Por otro lado, antes de sustituir se hace necesario despejar el término de la velocidad de la ecuación:

$$(P_e - P_s) - \left( \rho \frac{v_e^2}{2} - \rho \frac{v_s^2}{2} \right) = \Delta p$$

Despejando en la ecuación 1, la ecuación 2 se obtiene:

$$\frac{2(P_e - P_s)}{\rho} + \left[ \left( \frac{A_s}{A_e} v_s \right)^2 - v_s^2 \right] = \frac{2\Delta p}{\rho}$$

Como se busca despejar la velocidad de salida:

$$\left[ \left( \frac{A_s}{A_e} \right)^2 - 1 \right] v_s^2 = \frac{2\Delta p}{\rho} - \frac{2(P_e - P_s)}{\rho} = \frac{2(\Delta p - (P_e - P_s))}{\rho}$$

$$v_s = \sqrt{\frac{\frac{2(\Delta p - (P_e - P_s))}{\rho}}{\left[ \left( \frac{A_s}{A_e} \right)^2 - 1 \right]}}$$

Se conoce que la presión de entrada son 20 bares y la salida es presión atmosférica (1 bar). Para la pérdida de carga en la boquilla, se coge el como valor de referencia la pérdida de carga de la boquilla hallada en el punto 3.7., y cuyo valor es de 2 bar. El numerador pues, es un valor constante.

Así pues dejando la velocidad de salida en función de las áreas:

$$v_s = \sqrt{\frac{\frac{2(2 - (20\text{bar} - 1\text{bar}))}{\rho}}{\left[ \left( \frac{A_s}{A_e} \right)^2 - 1 \right]}} = \sqrt{\frac{\frac{2 \cdot 17 \text{ bar}}{\rho}}{\left[ 1^2 - \left( \frac{A_s}{A_e} \right)^2 \right]}} = \sqrt{\frac{\text{cte}}{\left[ 1^2 - \left( \frac{A_s}{A_e} \right)^2 \right]}}$$

De esta ecuación se concluye que si se mantienen constantes los datos del numerador, lo que aumenta o disminuye la velocidad de salida y por tanto condicionara el diseño debe de ser el factor  $A_s/A_e$ .

- Si  $A_s \ll A_e$ : el factor  $A_s/A_e$  es aproximadamente 0 y la velocidad la más grande
- Si  $A_s \gg A_e$ : el factor  $A_s/A_e$  es mayor que 1, y al aumentar el denominador disminuye la velocidad de salida

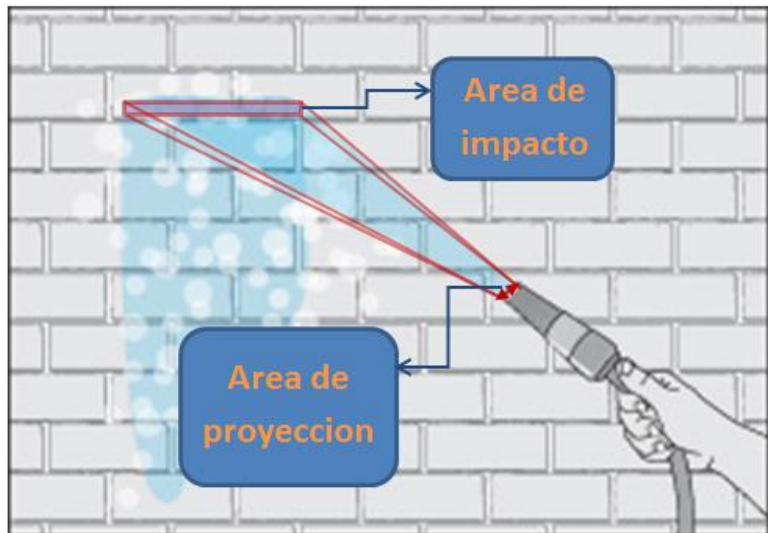
En definitiva, un factor para conseguir aumentar la velocidad muy a tener en cuenta es la relación de áreas de entradas y salida. Por tanto se deduce que la reducción del área de salida contribuye a aumentar la velocidad. Pero no solo entra en juego ese parámetro, otro factor importante a la hora de limpiar el área del chorro que cubre a la salida, que caracteriza el tiempo de limpieza. Se hace necesaria una convergencia entre área del chorro y minimización del área de salida.

### 3.9.3. ESTUDIO DEL AREA DE IMPACTO O DE LIMPIEZA

#### DEFINICION DE PARAMETROS A ESTUDIO

Otro parámetro importante a tener en cuenta en el diseño, es el área de proyección del chorro provocado por el orificio de salida. Esta área de proyección o área de salida condiciona a su vez la proyección sobre la superficie de impacto. En la siguiente figura se puede observar los parámetros a estudio:

**Imagen 3.18.-** Imagen de las áreas que caracterizan el chorro de una manguera a presión



El área de impacto es función de la velocidad, de la distancia de la superficie a limpiar al operario que usa la manguera, y del abanico de apertura provocado por el orificio de salida. El abanico de apertura viene condicionado a su vez por el orificio de salida y por las componentes de la velocidad perpendiculares al plano del chorro. Por tanto en función del tipo de boquilla y de la forma del orificio, condicionará la forma del abanico de apertura y se tendrán varios tipos de áreas de limpieza o impacto.



**Imagen 3.19.-** Abanico de apertura. Es el ángulo con el que el chorro se abre. El área de proyección es un círculo

### TIPOS DE AREAS DE IMPACTO EN FUNCION DE LAS BOQUILLAS

En la actualidad existen diversos tipos de boquillas para la limpieza. Los más usados son (**Fuente:** Catalogo de la empresa Pentair 'PNR'):

- *Boquilla estándar de cono completo:* Este tipo de boquillas es la mas usada en la actualidad. Consta de un orificio de salida que condiciona el area de impacto en funcion del mismo. El ángulo de apertura puede oscilar desde los 15º hasta los 120º. Aunque el area suele ser circular, el area puede tener varias formas en función de la boquilla elegida.



**Imagen 3.20.-** Imagen de cómo conforman las gotas de agua el área de proyección

- *Boquilla de cono completo en espiral.* La rotacion que se imprime por la forma caracteristica de la boquilla, dota de fuerza centrifuga a las particulas fluidas.



- *Boquilla múltiple de cono completo:* Consta de un sistema complejo estudiado de manera que el caudal se reparta de forma igual por los varios orificios de salida que posee.



- *Boquilla de presión en línea plana:* El líquido entra en la boquilla de acuerdo con su eje. El líquido se alimenta entonces a una cámara a presión, desde donde es forzado a salir a través del orificio de la boquilla. El valor de flujo y pulverización ángulo se determina, respectivamente, por la sección transversal del orificio y el orificio de perfil.



- *Boquilla de presión en línea recta:* Parecidas a las boquillas de pulverización de chorro línea plana, pero estas proyectan una elipse plana. No hay ángulo de pulverización, ya que se produce un chorro directo de líquido. Son conocidas en el sector como chorro de lápiz, y estas tienen mucha estabilidad y además son capaces de transmitir un poderoso impacto. A menudo se utilizan para procesos de limpieza o para cortar suave materiales.



- *Boquillas de cuchara:* En ellas, el líquido que sale por el orificio impacta sobre una superficie curva suave (que también se conoce como cuchara) para producir un patrón de pulverización de chorro de abanico plano. Este eficiente diseño utiliza la misma presión de alimentación en forma de chorros de abanico plano convencionales, pero logra un alto impacto chorro de agua, especialmente útil cuando de limpieza se trata.



- *Boquillas de patrón de cono hueco:* Un patrón de pulverización de cono hueco se caracteriza porque el fluido se proyecta como una corona circular, sin gotitas en el interior del patrón de pulverización. Se usan normalmente para reducir la contaminación, en aplicaciones de refrigeración de gas, además de en muchos otros procesos industriales. Se pueden dividir en boquilla de turbulencia y de desviación, en función de si se quiere ángulos para la pulverización anchos (se usa en procesos de refrigeración) o si se prefiere cubrir una gran superficie con el fluido separado en varias gotas pequeñas (usado en la lucha contra incendios).



### 3.9.4. MATERIALES DE FABRICACION

Es importante conocer el comportamiento de las boquillas en la práctica. Según los expertos, las boquillas tienen duración de uno a dos meses, dependiendo de su uso, la temperatura de trabajo y el cuidado de la misma. Las boquillas suelen dejar de ser efectivas o romperse debido principalmente a la alta presión del fluido, que erosiona el orificio de la misma. Para evitar la corrosión se usan obviamente, materiales inoxidables y se requiere materiales ligeros para facilitar la labor del operario y que posea una gran resistencia a los golpes.

En un catálogo de una empresa de fabricación de boquillas, se puede observar la gran diversidad de materiales de las cuales se pueden fabricar las boquillas (Fuente: Catálogo de la empresa Pentair 'PNR'):

NOZZLE MATERIAL CODES

A1	Carbon steel	D7	High density polyethilene	L8	Hastelloy C276
A2	High speed steel	D8	Polyvinylidene fluoride (PVDF)	P6	Acr. But. Styrene (ABS)
A8	Zinc coated steel	E0	EPDM	P8	EPDM 40 Shore
A9	Nickel coated steel	E1	Polytetrafluorethylene (PTFE)	T1	Brass
B1	AISI 303 Stainless steel	E2	PTFE (25% glassfibers)	T2	Brass, chrome plated
B2	AISI 304 Stainless steel	E31	Acetalic resin (POM)	T3	Copper
B21	AISI 304 L Stainless steel	E7	Viton	T5	Bronze
B31	AISI 316L Stainless steel	E8	Synthetic rubber (NBR)	T8	Brass, nickel plated
C2	AISI 416 Stainless steel, hardened	F5	Ceramic	T81	Brass, electroless nickel plated
D1	Polyvinylchloride (PVC)	F31	Ruby insert, 303 body	V1	Aluminum
D2	Polypropylene (PP)	G1	Cast iron	V7	Aluminum, electroless n. plated
D3	Polyamide (PA)	H1	Titanium		
D5	Talcum filled Polypropylene	L1	Monel 400		
D6	Glassfibre reinforced PP	L2	Incolloy 825		

Imagen 3.21.- Imagen del catálogo de la empresa Pentair 'PNR' de la sección de materiales de boquillas

La boquilla actualmente usada pertenece al catálogo de PNR, y tiene código B1 (serigrafiado en un lateral de la boquilla), por tanto el material usado en la misma es acero inoxidable AISI 303. Presenta una excelente comportamiento para el uso requerido y el precio económico.

### 3.9.5. METODOS DE FABRICACION

Las boquillas actuales se fabrican por maquinaria industrial de control numérico, a partir de una preforma cilíndrica de una barra de aluminio. Se hacen en serie de manera automatizada. Adicionalmente se pueden fabricar en tornos, fresas manuales o CNC de manera individual. Pero esto elevaría el coste por unidad y cada vez que se requiriera una nueva habría que esperar tiempo para reponerlas.

Por tanto es importante estudiar y valorar la forma de fabricar las boquillas. Teniendo en cuenta que si no son normalizadas hay parámetros como costes y tiempos de reabastecimientos que pueden influir en la decisión del método de fabricación.



Imagen 3.22.- Fotografía de un máquina CNC trabajando una barra cilíndrica de acero

### 3.10. MODELOS ELEGIDOS A ESTUDIO

Para escoger los modelos de terminal que serán simulados, los parámetros de la boquilla que deben de valorarse son:

- Se requiere alta presión
- Alta temperatura de operación
- Consumo reducido
- Mínima pérdida de carga o caída de presión en la pared de la boquilla
- Con la boquilla intentar buscar una disminución del tiempo de uso de la manguera
- Estudio del área de proyección e impacto, ya que cuanto mayores sean menor será el tiempo de uso

Intentado cumplir los requisitos anteriores citados los modelos a estudio, reduciendo los tipos de boquillas que se simularán, son:

- *Boquilla de presión plana elipsoidal:* Son las más usadas junto con la de línea recta o boca de pato. Son muy efectivas en limpieza.
- *Boquilla de presión de línea recta o de boca de pato:* Presenta más uniformidad del área de proyección, y con un comportamiento similar al de la boquilla elipsoidal.



- *Boquilla circular*: El área del círculo es la que más efectiva, sin esquinas donde aparezcan menos velocidad o se produzcan zonas de gran turbulencia y fricción, con un área de impacto con presión uniforme.
- *Boquillas con rotación*: Es interesante la idea de dotar al fluido de cierto giro. Por ello se ha pensado en el interior proponer una forma helicoidal a la pared.

Estos serán los modelos estudiados, ya que se adecuan mejor a las características de limpieza a presión que deben poseer.

### 3.11. NORMATIVA Y SUBVENCIONES

La norma del secadero se compone en varias partes. Las características constructivas de la nave están regidas por el Código Técnico de Edificación, 'CTE'. (Fuente: <http://www.codigotecnico.org/web>)

Por otro lado el ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente tiene normas las cuales indican como debe ser el funcionamiento en las plantas de procesamiento de carne. La normativa que rige estas plantas es:

- *Real Decreto 1904/93 - B.O.E. 11/02/94 — Real Decreto 1916/97 - B.O.E. 13/01/98: condiciones técnico-sanitarias sobre locales, equipos, útiles y personas en establecimientos en los que se manipulen, preparen, transformen y almacenen las materias primas y productos elaborados.*
- *Real Decreto 1644/ 1981, de 3 de agosto, Reglamentación Técnico-Sanitaria de Mataderos, Salas de Despiece, Centros de Contratación, Almacenamiento y Distribución de Carnes y Despojos y se fijan las condiciones mínimas de los Mataderos Municipales.*  
(Fuente: <http://www.boe.es/boe/dias/1981/08/05/pdfs/A17897-17898.pdf>).
- *Real Decreto 379/1984, de 25 de enero, por el que se aprueba la Reglamentación Técnico-Sanitaria de Industrias, Almacenes al por mayor y envasadores de productos y Derivados Cárnicos Elaborados y de los Establecimientos de Comercio al por Menor de la Carne y Productos Elaborados* (Fuente: <http://www.boe.es/boe/dias/1984/02/27/pdfs/A05273-05280.pdf>)

En estas normas no se establecen ningún tipo de restricción sobre el consumo de agua. Lo que sí establece es una concienciación sobre la minimización del empleo de los recursos en medida de lo posible.

Así pues, por contrato entre ambas empresas lo que si que se establecen son unos límites en la facturas del consumo de agua, con el fin de concienciar sobre el uso de este recurso. El coste del agua se descuenta de las facturas, a partir de informes que Incarlopsa hace sobre el consumo de agua (Fuente: Departamento de mantenimiento de Incarlopsa):

**CORRAL DE ALMAGUER**

AGUA FRIA			
	JUNIO	JULIO	AGOSTO
AGUA FRIA	SIN MEDICION. NO HAY CONTADORES		

AGUA CALIENTE			
2012	JUNIO	JULIO	AGOSTO
AGUA CALIENTE	3.698,00	3.926,00	3.844,00

2013	JUNIO	JULIO	AGOSTO
AGUA CALIENTE	3.311,00	3.232,00	3.279,00
OBJETIVO:Reduccion 15%	3.143,30	3.337,10	3.267,40
Diferencia	167,70	-105,10	11,60

TOTAL (m3) EXCESO TELIDE AGUA CALIENTE	74,20 m3		
--	----------	--	--

	m3	Importe m3	TOTAL
IMPORTE TOTAL EN CONTRA TELIDE	74,20	6,24 -	463,01 €

**Imagen 3.23.-** Documento informativo que elabora el departamento de mantenimiento, en el que se estipulan el consumo teórico límite y el producido realmente. La diferencia entre ellos puede ser un bonus o una penalización en función de si la diferencia es menor o mayor que la estipulada respectivamente

Por tanto, desde este punto de vista, es también importante para Telide buscar un ahorro para evitar las posibles penalizaciones por exceso de uso de agua. Otro punto a tener en cuenta son las subvenciones. El verano de 2013, se elaboró un informe, con el cual se hizo un estudio del consumo y el ahorro de agua por parte de Incarlopsa. Tras la iniciativa de la concienciación del consumo de agua, la junta de la diputacion de Castilla la Mancha premió a SECALSA por la iniciativa. Por su parte, SECALSA dotó con parte de esta subvención a TELIDE con 12.000 € para continuar con el estudio y desarrollo de nuevas tecnicas de limpieza en concepto de I+D.

Así pues, se pueden sacar cuatro motivos por los cuales se debe llevar a cabo el estudio:

- El ahorro debido a la disminución de volumen de agua caliente usado, reduciendo el caudal y disminuyendo el tiempo de uso de la manguera.
- Evitar las penalizaciones y conseguir una prima por el ahorro, además de posibles subvenciones y reconocimiento del estudio.
- La concienciación con el medio ambiente y minimización de los recursos. Mejora de imagen frente a empresas competidoras de Telide, valor añadido.

## 4. PROBLEMA FLUIDO. IMPLEMENTACIÓN AL ORDENADOR

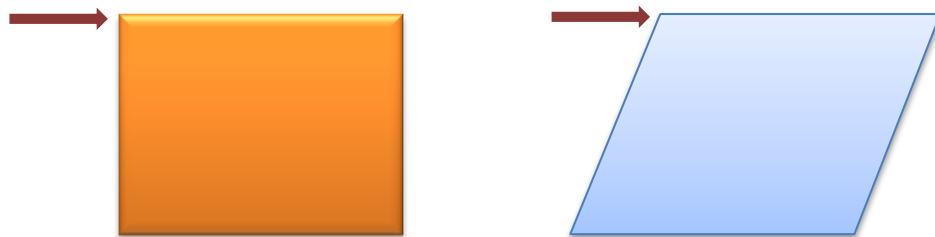
---

### 4.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA FLUIDO

A continuación se pretende explicar porque la resolución de este trabajo se debe de resolver con un programa de ordenador y cómo funciona el mismo, así como las ecuaciones que rige. El objetivo de este punto es tener un mayor conocimiento de cómo se va a resolver el trabajo. (Fuente: Apuntes de la asignatura Simulación Numérica de Flujo Industriales de la Universidad Carlos III).

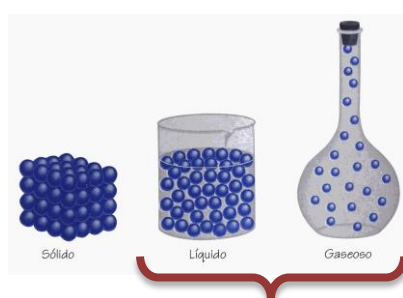
#### *FUNDAMENTOS DE UN FLUIDO*

Una partícula fluida se diferencia de una partícula sólida, debido a que no es capaz de asumir esfuerzos cortantes:



**Imagen 4.1.-** A la izquierda se ve como un sólido tras aplicarle una fuerza en una de sus esquinas no se deforma, debido a las propias fuerzas internas intermoleculares, que originan tensiones en el interior que la contrarrestan. Sin embargo, a la derecha, un fluido con al que se le aplica la misma fuerza es incapaz de oponerse a ella

Los fluidos pueden ser gases o líquidos. Para el objeto de estudio de este trabajo, el fluido es agua en estado líquido. La diferencia entre gas o líquido reside en la proximidad de las moléculas que lo conforman. Esto deriva en que las densidades de ambos son muy diferentes:



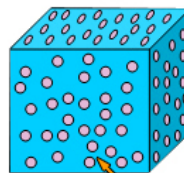
**Imagen 4.2.-** Se puede ver como la distancia entre las moléculas en un fluido, ya sea líquido o gaseoso, la distancia entre las moléculas es mayor, dotándolos de características físicas diferentes a un sólido

Debido a la alta densidad que posee el fluido líquido, se puede asumir incompresible y pesado, ya que poseen altas densidades (del orden de  $10^3 \text{ kg/m}^3$ ). Esto es en oposición a los gases cuyas densidades oscilan del orden de  $1 \text{ kg/m}^3$ . Por tanto, el fluido se puede aproximar a que se comporta como incompresible.

### *PARTICULA FLUIDA E HIPOTESIS DE MEDIO CONTINUO*

En el estudio de los fluidos se hace necesario el uso del concepto partícula fluida. Partícula fluida es la porción mínima de un fluido, pero que conserva las características del mismo. Matemáticamente se define con el concepto de densidad asociándola como límite de la variación de volumen:

$$\rho(\text{densidad}) = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{\Delta m}$$



**Imagen 4.3.-** El cubo representa una partícula fluida. Una porción mínima de fluido pero que conserva las características del mismo

Pero este diferencial de volumen del límite debe de ser lo suficientemente grande como para cumplir la hipótesis de medio continuo. La hipótesis de medio continuo, muy necesaria en la fluido mecánica, considera que el fluido es continuo a lo largo del espacio que ocupa, ignorando por tanto su estructura molecular y las discontinuidades asociadas a esta. Con esta hipótesis se puede considerar que las propiedades del fluido (densidad, temperatura, etc.) son funciones continuas, importante para poder resolver el problema con ordenador.

### *APARICION DE LA VARIABLE TIEMPO EN LA FLUIDO MECANICA. DEFINICION DE TRAZAS Y LINEA DE CORRIENTE*

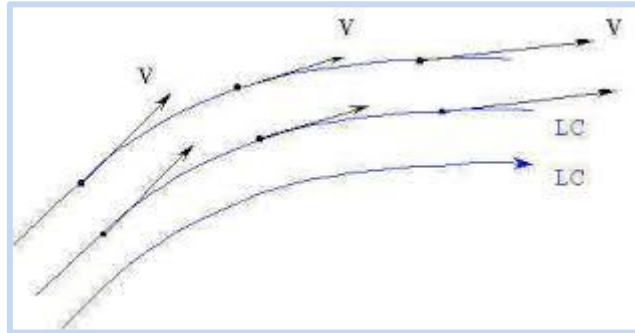
En los fluidos aparece otro parámetro importante en las ecuaciones. Mientras que hay parámetros dinámicos de un sólido pueden mantenerse constantes o lineales en el tiempo, en un fluido esto no ocurre así. Además existen parámetros físicos también dependen del tiempo. Así se tiene que:

$\rho(\vec{x}, t), T(\vec{x}, t), P(\vec{x}, t) \rightarrow$  forman un campo escalar

$\vec{v} = (u(\vec{x}, t), v(\vec{x}, t), w(\vec{x}, t)) \rightarrow$  forman un campo vectorial

En un fluido estacionario, como en el del problema, los parámetros del fluido no dependen del tiempo. En un fluido uniforme, los parámetros del fluido no dependen de la posición. Por otro lado aparecen los conceptos de trazas y líneas de corrientes, necesarios ya que después ayudará a simplificar y caracterizar el fluido.

- *Línea de corriente*: es la estela que forma la partícula a lo largo de una trayectoria, cuya propiedad es que es tangente a la velocidad en cada punto que la conforma. En un fluido estacionario estas líneas no varían con el tiempo.



**Imagen 4.4.-** Imagen de líneas de corriente (LC). Se observa como la línea es tangente a la componente velocidad de la partícula en cada punto

- *Traza*: por otro lado es la línea compuesta por todas las partículas que han pasado por una misma posición.



**Imagen 4.5.-** La imagen muestra la estela de un flujo turbulento. Muestra la posición en ese instante de las partículas que han pasado por el mismo punto

En principio no es lo mismo traza que línea de corriente, ya que la línea de corriente hace referencia a la velocidad de una partícula y traza es el recorrido de las partículas que han pasado por un mismo punto. Pero en un fluido estacionario estas son iguales, y es una de las características importantes en ellos.

## ACELERACION DE UNA PARTICULA FLUIDA

A diferencia de en un sólido, la aceleración de una partícula fluida es diferente de la derivada de la velocidad en un punto, ya que esa es la aceleración local.

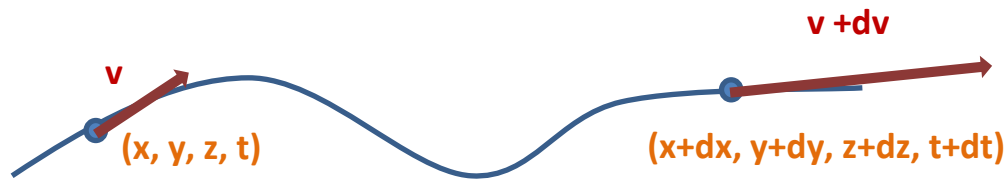


Imagen 4.6.- Imagen de cómo varía la aceleración con el tiempo

En un fluido hay que diferenciar en la aceleración total o global  $\frac{D\vec{v}}{dt}$ , en el término  $\frac{\partial \vec{v}}{\partial t}(\vec{x}, t)$  como aceleración local, y  $(\vec{v} \cdot \nabla)\vec{v}$  como término de aceleración convectiva:

$$\frac{D\vec{v}}{dt} = \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + u \frac{\partial \vec{v}}{\partial x} + v \frac{\partial \vec{v}}{\partial y} + w \frac{\partial \vec{v}}{\partial z} = \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla)\vec{v}$$

Cada una de estas aceleraciones tiene un significado diferente, la primera es la aceleración como sólido y la segunda aceleraciones propias de fluidos como por ejemplo, vórtices. A esta aceleración total,  $\frac{D\vec{v}}{dt}$ , también se la llama en teoría de fluidos como derivada sustancial. En un flujo estacionario,  $\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = 0$ .

## CINEMATICA DE UNA PARTICULA FLUIDA

Ahora bien, a continuación para describir el comportamiento y caracterizarlo en una partícula fluida, hay que estudiar las relaciones cinemáticas. En un trayecto de una partícula de P a Q como en el de la figura:

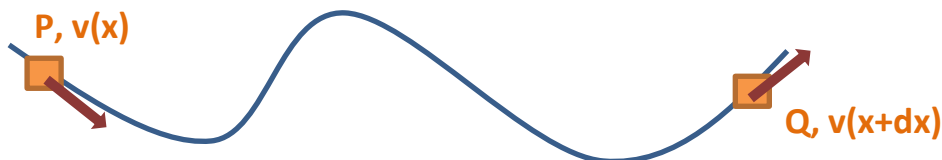
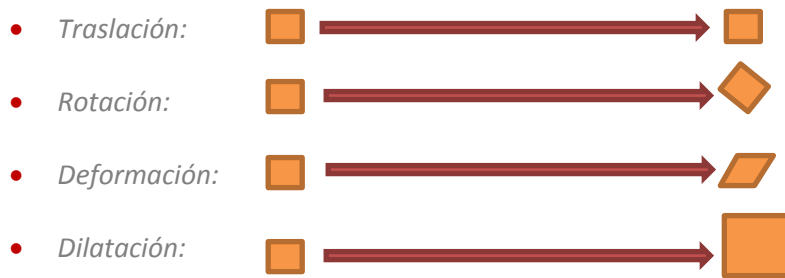


Imagen 4.7.- Trayecto de una partícula



El fluido está sujeto a las siguientes transformaciones debido a la aceleración del fluido a lo largo del trayecto P-Q:



**Imagen 4.8.-** Transformaciones que sufre la partícula debido al término convectivo.

Toda esta información se recoge en la propia ecuación del movimiento:

$$\vec{v}(\vec{x} + d\vec{x}) = \underbrace{\vec{v}(\vec{x})}_{\text{Traslación}} + \underbrace{d\vec{x} \cdot \nabla \vec{v}(\vec{x})}_{\text{Rotación, deformación y dilatación}}$$

En esta ecuación que define la velocidad, se caracteriza el movimiento del fluido por completo. Por ejemplo, podemos describir:

- *La vorticidad*  $\vec{\omega} = \nabla \times \vec{v}$ : que está relacionada con el grado de rotación del flujo. Si se considera el fluido como irrotacional,  $\vec{\omega} = \nabla \times \vec{v} = 0$ .
- *La divergencia de la velocidad*  $\nabla \cdot \vec{v}$ : contiene la información de la dilatación de las partículas fluidas. En particular se verá que  $\nabla \cdot \vec{v} = \frac{1}{\rho} \frac{D\rho}{Dt}$  es el ritmo de dilatación (explicado más adelante, ver punto de comentarios a la ecuación de continuidad). Si el fluido es incompresible se obtiene que  $\nabla \cdot \vec{v} = 0$ .

## ECUACIONES DE LA FLUIDO MECANICA PARA LA DINAMICA

Además de las ecuaciones mencionadas de posición y propiedades (6.1.6), y de la velocidad (6.1.5), existen otras ecuaciones propias de los fluidos que rigen la teoría de los fluidos. Estas ecuaciones son las llamadas leyes generales o de conservación. En estas ecuaciones se establece que se debe de conservar la masa, la cantidad de movimiento y la energía. Estas ecuaciones se cumplen también para un sólido, pero de forma diferente y no suelen aportar información trascendente.

Adicionalmente se puede plantear de dos maneras, de forma integral o de forma diferencial. Estas ecuaciones en forma integral, para un volumen de control ( $V_c$ ) son:

- *Conservación de masa:*

$$\frac{d}{dt} \int_{V_c} \rho \, dV + \int_{S_c} \rho (\vec{v} \cdot \vec{n}) \, dS = 0$$

- *Cantidad de movimiento:*

$$\frac{d}{dt} \int_{V_c} \rho \, \vec{v} \, dV + \int_{S_c} \rho \, \vec{v} (\vec{v} \cdot \vec{n}) \, dS = 0$$

- *Energía:*

$$\frac{d}{dt} \int_{V_c} \rho \left( e + \frac{v^2}{2} \right) \, dV + \int_{S_c} \rho \left( e + \frac{v^2}{2} \right) (\vec{v} \cdot \vec{n}) \, dS = 0$$

### COMENTARIOS DE LA ECUACION DE CONTINUIDAD

Estudiando la ecuación de la continuidad o conservación de la masa:

$$\underbrace{\frac{d}{dt} \int_{V_c} \rho \, dV}_{1} + \underbrace{\int_{S_c} \rho (\vec{v} \cdot \vec{n}) \, dS}_{2} = 0$$

**1:** Hace referencia del aumento de masa en  $V_c$ . Si para el problema se escoge un volumen de control que no varía con el tiempo, es decir, un volumen de control fijo, se obtiene:

$$\frac{d}{dt} \int_{V_c} \rho \, dV \rightarrow \int_{V_c} \frac{\partial \rho}{\partial t} \, dV$$

**2:** Hace referencia al flujo convectivo de masa por  $S_c$ . Si se aplica el teorema de Gauss a esta parte:

$$\int_{S_c} \rho (\vec{v} \cdot \vec{n}) \, dS = 0 \rightarrow \int_{V_c} \nabla \cdot (\rho \cdot \vec{v}) \, dV = 0$$

Tras simplificar por separado los términos, al volver al plantear la ecuación:

$$\int_{V_c} \left[ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot \vec{v}) \right] \, dV = 0$$

Sabiendo que la ecuación se debe cumplir para cualquier volumen de control fijo y después simplificando la misma con cálculos vectoriales:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot \vec{v}) \rightarrow \underbrace{\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \rho}_{\frac{D\rho}{Dt}} + \rho \cdot \nabla \vec{v} = 0$$

$\frac{D\rho}{Dt}$  : Como varia la densidad de Energía a lo largo del tiempo

Si la densidad no cambia, como en el caso de líquidos y gases a poca velocidad, el fluido es incompresible, y por tanto se obtiene que  $\frac{D\rho}{Dt} = 0$ , y por otro lado  $\vec{v} \cdot \nabla \rho = 0$ . Esto es importante porque trasciende a otras ecuaciones y simplifica el problema.

### COMENTARIOS A LA ECUACION DE LA CANTIDAD DE MOVIMIENTO

Esta ecuación de la cantidad de movimiento es análoga en la mecánica de sólidos a la ecuación de Newton.

$$\begin{aligned} \text{Newton} &\leftrightarrow \text{C. Mov.} \\ F &= m \cdot a \leftrightarrow f = \rho \cdot a \end{aligned}$$

En esta ecuación, los términos de fuerza y aceleración tienen más componentes:

- $f$ : es la fuerza por unidad de masa. Esta fuerza se divide en fuerzas externas 'de volumen' (como ejemplo, la gravedad) y fuerzas internas 'de superficie' (como son las fuerzas de presión y de volumen).
- $a$ : compuesta por la derivada sustancial, es decir, la aceleración total. Esta aceleración está conformada por la aceleración local y aceleración convectiva.

Finalmente la ecuación de continuidad queda:

$$\rho \cdot \frac{D\vec{v}}{Dt} = \rho \vec{g} - \nabla P + \nabla \cdot \vec{\tau}'$$

En esta ecuación, si se desprecian las fuerzas viscosas, esta cambia a la llamada ecuación de Euler:

$$\rho \cdot \frac{D\vec{v}}{Dt} = \rho \vec{g} - \nabla P$$

Además de esta ecuación, conocemos de puntos anteriores otras ecuaciones que caracterizan el flujo, ya que lo consideramos irrotacional e incompresible:

$$\nabla \times \vec{v} = 0, \nabla \cdot \vec{v} = 0$$

De la ecuación de Euler, si el fluido es incompresible y con la información de las ecuaciones anteriores, se deduce la ecuación de Bernoulli, la cual aplica a las líneas de corriente del fluido. Como el fluido es irrotacional la ecuación de Bernoulli pasa de aplicarse a una única línea de corriente a todo el campo fluido.

$$P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho g = \text{constante}$$

### *COMENTARIOS A LA ECUACION DE LA ENERGIA*

Es la más compleja de resolver, y por tanto más tiempo se empleará en ella. Aplicando cálculo vectorial la ecuación se puede expresar como:

$$\frac{D}{Dt} \left( e^2 + \frac{v^2}{2} \right) = \rho \vec{g} \cdot \vec{v} - \nabla P \cdot \vec{v} + \nabla \cdot (\vec{\tau}' \cdot \vec{v}) + \nabla \cdot (k \nabla T) + \dot{q}$$

Para el trabajo se desactivará esta ecuación con el fin de facilitar el cálculo y el tiempo. Esto se puede hacer ya que no existe generación de calor, y debido al enorme caudal se puede despreciar la energía que se disiparía por conducción a través del acero. Un parámetro que si hay que tener en cuenta es la viscosidad dinámica, que debido al régimen turbulento en el que se encuentra, será necesario estudiar por separado con el programa.

### *RELACION CONSTITUTIVA. ECUACION DE NAVIER-POISSON*

Otra simplificación importante para analizar el fluido a estudio, es tratarlo como fluido newtoniano. Un fluido newtoniano es aquel cuya viscosidad puede considerarse constante en el tiempo. Los fluidos newtonianos son uno de los fluidos más sencillos de describir. La principal característica es que la curva que muestra la relación entre el esfuerzo o cizalla contra su velocidad de deformación es lineal. El mejor ejemplo de este tipo de fluidos es el agua en contraposición al pegamento o la miel.

Estos fluidos siguen la ley de Navier Poisson, que dice relaciona  $\bar{\tau}$  con el campo de velocidades:

$$\bar{\tau} = \mu(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) + (\mu_v - 2/3 \mu)(\nabla \cdot \vec{v}) \bar{\delta}$$

- El segundo término solo importa para líquidos incompresibles, cuando  $\nabla \cdot \vec{v} \neq 0$
- En el plano el esfuerzo cortante queda como  $\tau_{xy} = \mu \frac{du}{dy}$ . Y en general, esta viscosidad que se hace importante objeto de estudio queda como que viscosidad  $\mu$  es función de la temperatura y la presión  $\mu(P, T)$ .

### RESUMEN DEL PROBLEMA TEORICO

En general se tiene para la resolución de un problema fluido, se tienen las conocidas como las ecuaciones de Navier Stokes:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot \vec{v}) \\ \rho \cdot \frac{D\vec{v}}{Dt} = \rho \vec{g} - \nabla P + \nabla \cdot \bar{\tau}' \\ \frac{D}{Dt} \left( e^2 + \frac{v^2}{2} \right) = \rho \vec{g} \cdot \vec{v} - \nabla P \cdot \vec{v} + \nabla \cdot (\bar{\tau}' \cdot \vec{v}) + \nabla \cdot (k \nabla T) + \dot{q} \\ \bar{\tau}' = \mu(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) + (\mu_v - 2/3 \mu)(\nabla \cdot \vec{v}) \bar{\delta} \end{array} \right.$$

Los coeficientes de transporte:  $\mu = \mu(P, T)$ ,  $\mu_v = \mu_v(P, T)$ ,  $k = k(P, T)$

2 ecuaciones de estado:  $P = P(\rho, e)$ ,  $T = T(\rho, e)$   
 $\rho = \rho(P, T)$ ,  $e = e(P, T)$

Estas se pueden simplificar si el flujo es compresible e isoterma. A estas nueve ecuaciones, con nueve incógnitas, se las suman para cada caso sus condiciones iniciales y sus condiciones de contorno del problema.

Como se puede deducir el problema es complejo de resolver, y no siempre tiene solución. Por ello para abordar el estudio fluido-dinámico del problema es necesario usar un programa de fluidos cuyas leyes de la ingeniería de fluidos las calculé computacionalmente.

Por otro lado las simplificaciones y las condiciones impuestas condicionan la resolución del mismo. Es importante conocer las mismas y los pasos seguidos para la resolución con el fin de valorar después la solución resultante.

## 4.2. MECANICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

### *INTRODUCCION Y FUNCIONAMIENTO DE LOS CFD*

Debido a la gran complejidad del problema presentado, se hace necesario el uso de un ordenador potente para resolver el gran volumen de cálculo necesario para la resolución de estas ecuaciones. A esta rama de programas de ordenador que resuelven estas ecuaciones, se les conoce como CFD (Computer Fluid Dynamics).

El funcionamiento de los programas de cálculo computacional se basa en la resolución de las ecuaciones de conservación (masa, cantidad de movimiento y energía) y leyes fluidas, para dar predicciones cuantitativas de un flujo. Para la resolución de estos problemas por ordenador se debe de conocer previamente la geometría, las propiedades de fluido, condiciones de contorno y condiciones iniciales. El problema se resuelve mediante iteraciones de todas las ecuaciones, por tanto el resultado puede no ser exacto sino que tendrá un margen de error. El resultado que ofrece el programa son un conjunto de parámetros numéricos para una cierta posición en un cierto momento de tiempo.

En estos problemas no es tan importante el valor numérico del resultado, como en el contexto en el que se produce la solución. Tener en cuenta los errores, simplificaciones, condiciones contorno e iniciales a la hora de dar un resultado es crucial a la hora de evaluar la fiabilidad del resultado obtenido.

### *VENTAJAS E INCONVENIENTES DEL CÁLCULO COMPUTACIONAL*

Actualmente esta técnica, gracias a la gran evolución de los computadores, el avance y conocimiento de la técnica, se pueden modelizar problemas con resultados bastantes precisos. Entre las ventajas están del cálculo computacional:

- La producción de modelos y resultados es barato y rápido.
- La potencia de los ordenadores actuales es grande, y con el paso del tiempo va aumentando
- Es fácil hacer barridos paramétricos, es decir, es fácil optimizar los diseños
- Puede resolver problemas imposibles de resolver manualmente
- Se pueden discretizar ciertos efectos físicos, imposibles analizar en un experimento

El mayor inconveniente del cálculo computacional son los errores. Estos errores que parten de que los resultados no son exactos, ya que la resolución se realiza mediante iteraciones de los cálculos de las ecuaciones. Estos errores se componen de:



- *Errores de discretización:* Las ecuaciones se plantean de manera continua en el espacio-tiempo, y el programa solo puede abarcar un número finito de posiciones y tiempos. Este número de finito de posiciones y tiempos se conoce como malla computacional. A mayor número de celdas de la malla computacional más exacto será el resultado que ofrezca.
- *Errores en los datos de partida:* Puede ser que no se conozcan ciertos parámetros iniciales o que no se mantengan constantes, así como que sea necesario simplificar parámetros de la geometría para poder resolver el problema.
- *Errores en las condiciones iniciales y de contorno:* Ya que al escoger las condiciones puede que no se ajusten a la realidad del todo.
- *Errores de modelado:* ciertos fenómenos físicos no tienen teorías completas, como pueden ser turbulencias, atmosfera, problemas multifásicos...

## SISTEMATICA DE LA RESOLUCIÓN

La complejidad reside más allá de introducir parámetros y anotar resultados, se hace necesario entender la física del flujo y entender los métodos numéricos, para analizar después detenidamente el resultado. Dicho de otra manera se hace necesario conocer lo que debería salir.

Los pasos a seguir de cualquier programa de CFD son los mismos o muy parecidos. De forma resumida son:

- *Paso 1:* Analizar el problema, asumir hipótesis, simplificaciones (simulación en 2D o 3D, estacionario o transitorio, viscoso-laminar-turbulento, compresible o incompresible)
- *Paso 2:* Discretizar el dominio espacial y temporal. Generar una malla computacional, con suficiente resolución y elegir los parámetros de la misma (estructurada o no, como son los elementos elegidos, etc.)
- *Paso 3:* Discretizar las ecuaciones. El método empleado puede ser cualquiera de estos cuatro: método de las diferencias finitas, elementos finitos, método espectral o que usa el programa de este estudio, el método de los volúmenes finitos.
- *Paso 4:* Implementar condiciones iniciales y de contorno
- *Paso 5:* Resolver las ecuaciones discretizadas, que los ordenadores lo hacen mediante un método iterativo.

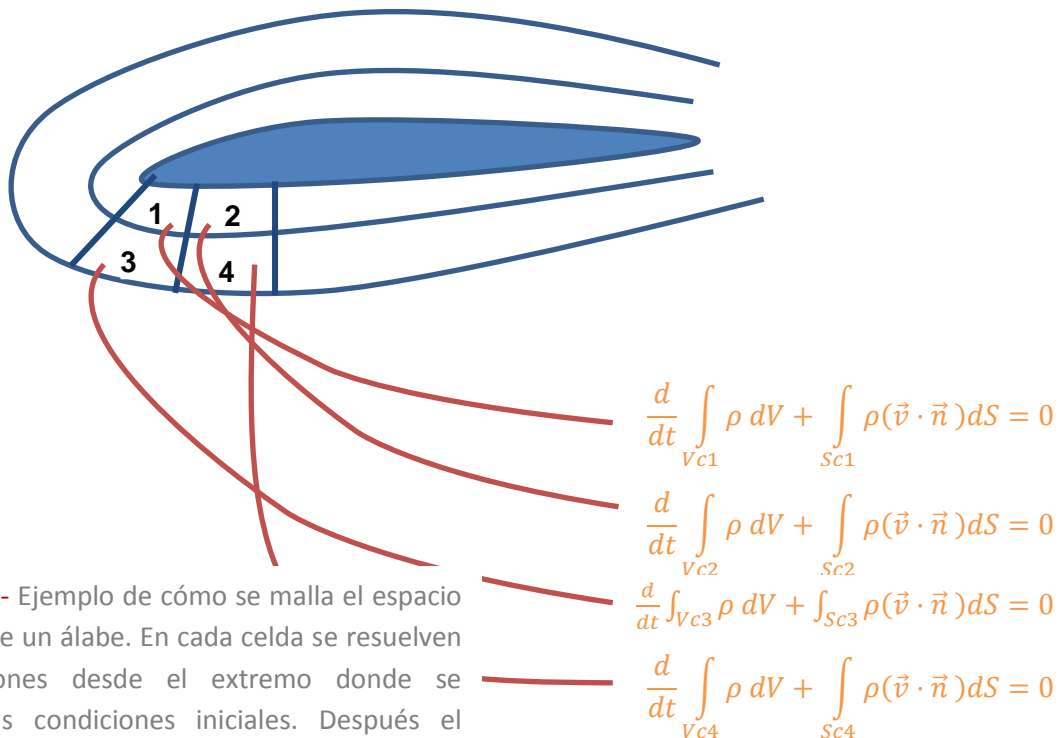
- **Paso 6:** visualizar resultados y hacer las valoraciones pertinentes sobre el mismo. Es tan importante el número del resultado como el contexto con el que se proporciona el mismo (errores, simplificaciones y resolución de la malla).

## METODO DE LOS VOLUMENES FINITOS

Este estudio se usará el programa Ansys Fluent, que será el CFD con el que se realizara el estudio, basado en el método de los volúmenes finitos. El método de volúmenes finitos (FVM) es un método para representar y evaluar ecuaciones diferenciales parciales en forma de ecuaciones algebraicas. Similar al método de diferencia finita o método de elementos finitos, los valores se calculan en lugares discretos en una geometría de malla.

Un volumen finito, se refiere al pequeño volumen que rodea a cada punto de nodo de una malla. En el método de volumen finito, las integrales de volumen en una ecuación diferencial parcial que contiene la divergencia, se convierten en integrales de superficie, utilizando el teorema de la divergencia. Estos términos se evalúan entonces como en las superficies de cada volumen finito. Debido a que el flujo de entrada en un volumen es idéntico al que deja el volumen adyacente, el flujo se puede considerar constante.

Otra ventaja del método de volúmenes finitos es que es fácilmente formulado para permitir mallas no estructuradas. El método se utiliza en muchos de dinámica de fluidos computacional por paquetes. Por ejemplo, al discretizar la ecuación de la conservación de la masa de la zona fluida cercana a un álabe:



**Imagen 4.9.-** Ejemplo de cómo se malla el espacio alrededor de un álabe. En cada celda se resuelven las ecuaciones desde el extremo donde se conocen las condiciones iniciales. Después el resultado de esa celda será la condición inicial de la siguiente y así sucesivamente hasta resolver todas las celdas.

En un flujo convectivo, entre las superficies de contacto entre una celda y otra se debe cumplir la continuidad entre ellas, y el programa debe ser capaz de reconocer estas para ahorrar calculo, por tanto, no es una resolución compleja. Los resultados en la celda 1, serán las condiciones iniciales de la celda 2, por lo cual los errores de cálculo se arrastran. En cada celda, si se dividen en celdas cuadrilaterales, habrá cuatro nodos. Por tanto la información se transmitirá mediante estos nodos que comparten las celdas contiguas.

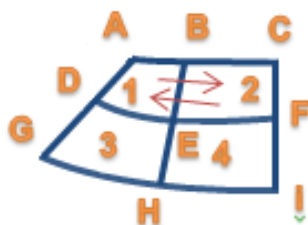


Imagen 4.10.- Imagen de celdas y nodos

En resumen, para resolver cada celda, hay que resolver todo el problema fluido en ella (mediante iteraciones), y arrastrar los datos calculados como condiciones iniciales a la siguiente celda. Además el programa debe de saber que celda está resolviendo y asegurar así la continuidad. A esto hay que añadir que a veces la resolución se complica ya que uno de los datos a resolver es la propia incógnita, y se debe de resolver el problema en función de la incógnita y completarlo mediante iteraciones. Por tanto, el uso de CFD hace posible la resolución de problemas que de otra manera no se podría.

### *APLICACIÓN DEL METODO AL PROBLEMA*

Para el objeto de estudio de este problema, se recreará la zona interna de la boquilla y se establecerá la malla de la misma. Conociendo la geometría de esta zona completamente y que a la entrada la presión es de 20 bares, y a la salida habrá un 1 bar (correspondiente a la presión atmosférica), se buscará hallar será la velocidad a la salida de la boquilla. Esta velocidad permitirá hallar después el valor del caudal.

El proceso de elaboración del estudio será realizar la boquilla actual, y comprobar que el resultado del caudal arrojado por el programa de ordenador, es el mismo que el hallado en la práctica, quedando demostrado de esta manera que la simulación por ordenador es factible.

# 5. SIMULACION POR ORDENADOR DEL PROBLEMA FLUIDO

---

## 5.1. INTRODUCCION Y PLANTEAMIENTO DEL PROCESO

Para la resolución computacional del problema comentado, el cálculo de las integrales de los volúmenes finitos, se hace necesario un programa que trabaje con este método. En el mercado existen varios programas que trabajan el cálculo computacional de dinámica de fluidos, entre los cuales esta ANSYS WORKBENCH 14. El programa consta de varios módulos de varios ámbitos de ingeniería, desde valoraciones electromagnéticas, transferencia de calor, resistencia de materiales...

El módulo que interesa se llama FLUENT, que basa su funcionamiento en el CFD. El programa consta de una herramienta para la elaboración de volúmenes de control (o zona fluida). Pero como es una herramienta primitiva, en el trabajo se plantea el uso de un programa de modelado 3D, y la posterior exportación del modelo sólido al módulo de simulación como zona fluida.

Para realizar este paso, se utilizará un programa de modelización en 3D, que se basa en crear objetos en tres dimensiones de igual manera que se hace en una máquina CNC. A este tipo de programas se les conoce por las siglas CAD (Computer Aided Design). El programa sirve para hacer sólidos mediante operaciones booleanas, sumar o restar material, siguiendo los mismos procesos con los que se fabricaría en la realidad).

El programa será usado para simular la boquilla en dos partes:

- La boquilla, tal y como es realmente. Aunque para la simulación y los cálculos no será útil, si caracterizará las dimensiones y la zona interior.
- La inversa del interior la boquilla, que es modelar el hueco por el que circulará el agua. Esta zona se modelizará en base al hueco interno de la boquilla, para asegurar que la zona fluida es factible de realizarse mediante mecanizados.

Este programa es útil, porque además de corresponderse con el método de fabricación real y ofrecer planos y cotas de la pieza, es interesante por ser compatible con Ansys Workbench, lo que permitirá simular la geometría interna y exportarla para usarla como zona fluida.

Tras la realización del paso anterior, y tener modelada la zona fluida, se importara a Fluent. El siguiente paso será asignar a esta zona una malla computacional. Tras este paso, se deberán establecer las condiciones iniciales y de contorno, y se procederá a obtener la solución del problema, mediante una serie iteraciones con un error límite asociado que será el criterio de convergencia impuesto previamente. Una vez converja el caso con el criterio impuesto, habrá que ir al apartado del programa de resultados y obtener el valor de la velocidad de salida de la boquilla, así como el caudal de la misma, los dos parámetros necesarios para el estudio.

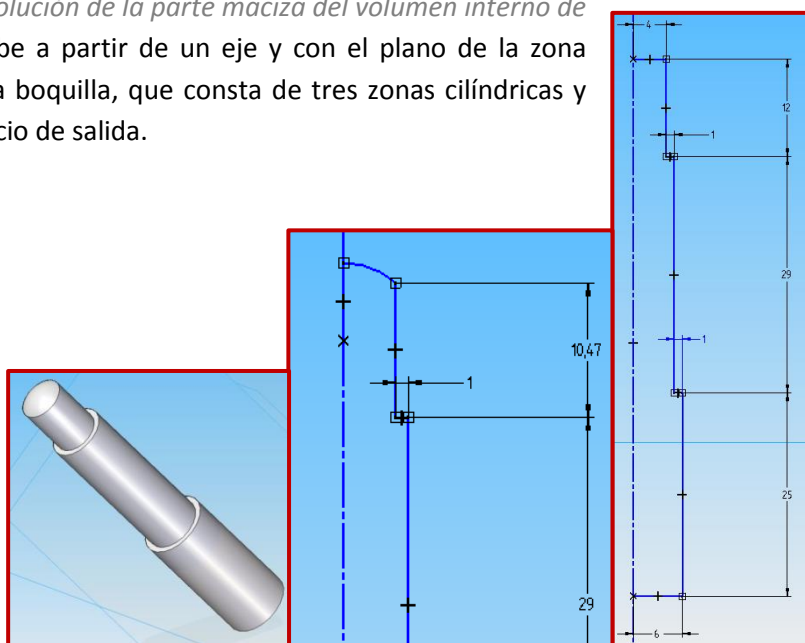
## 5.2. RECREACION DE LA ZONA INTERNA POR ORDENADOR: SOLID EDGE V19

Como ya se ha comentado, para realizar el modelo de la zona interna de la boquilla, se usara el programa Solid Edge v19. Esto se debe a que se va a trabajar con el programa de simulacion de flujo Fluent. Para modelar el fluido que circula por el interior de la misma, deberemos modelar el interior 3D con un programa compatible, como es Solid Edge v19. Como se quiere modelar la zona fluida, en lugar de modelar la boquilla se debe modelar el interior (o hueco de la boquilla), para que después el propio programa Fluent reconozca como zona fluida como volumen de control donde se realizará la simulación.

A partir de operaciones de añadir y quitar material se debera modelar asi el volumen del hueco del ordenador, con las dimensiones sacadas de la boquilla real. El proceso, descrito paso a paso y con todo detalle en el Anexo I, se compone de tres pasos:

- 1) *Protrusión por revolución de la parte maciza del volumen interno de la boquilla:* Se debe a partir de un eje y con el plano de la zona interna modelar la boquilla, que consta de tres zonas cilíndricas y una curva del orificio de salida.

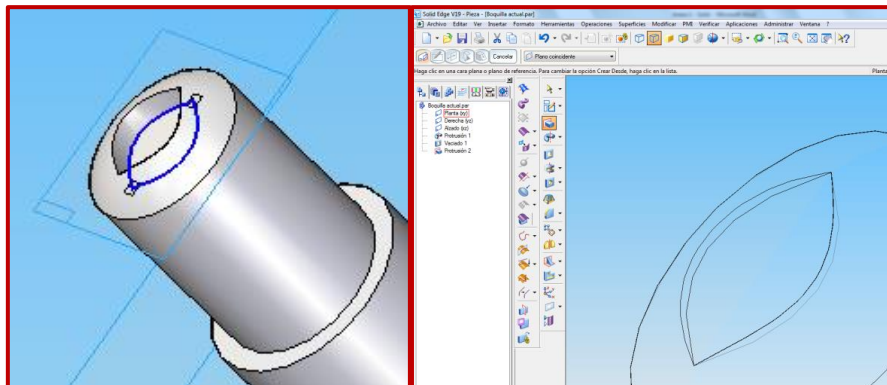
**Imagen 5.1.-** Diseño por ordenador de la zona interna de la boquilla



- 2) *Recreación del orificio de salida en el extremo curvo de la pieza:* Consta de una operación de vaciado con la forma del orificio en la zona curva, hasta el plano del comienzo de la parte cilíndrica. Después, se completa con una de protusión desde el mismo plano del comienzo cilíndrico hasta donde empieza el tramo curvo. De esta manera la superficie del orificio sera plana y paralela a la superfice de entrada. Esto simplifica el cálculo del gasto másico de agua, ya que de otra manera habría que proyectar en un plano y hallar el gasto a traves de él.

Lo más importante, por lo que debe de realizarse de esta manera, es porque deben existir diferentes superficies para las diferentes zonas del modelo. Es decir, el modelo Solid creará un macizo sólido que después Ansys leerá, y que para distinguir las superficies Fluent la definirá con las aristas del modelo. Estas superficies son importantes en el proceso de simulación ya que se podrán seleccionar y caracterizar, como por ejemplo con las condiciones de contorno. Si no se carga el modelo con las superficies definidas con aristas, habría que posteriormente definir el orificio de salida en Ansys. Como es una superficie compleja no se podría definir correctamente con el módulo de geometria de Fluent.

Por este motivo, el modelo se realizará de la manera explicada, simplificando la superficie del orificio de salida a un plano. Esto solo ocurre en este tipo de boquilla con forma de elipsoide, en el resto el orificio coincidirá completamente con la superficie y quedará definida con las propias operaciones de Solid.

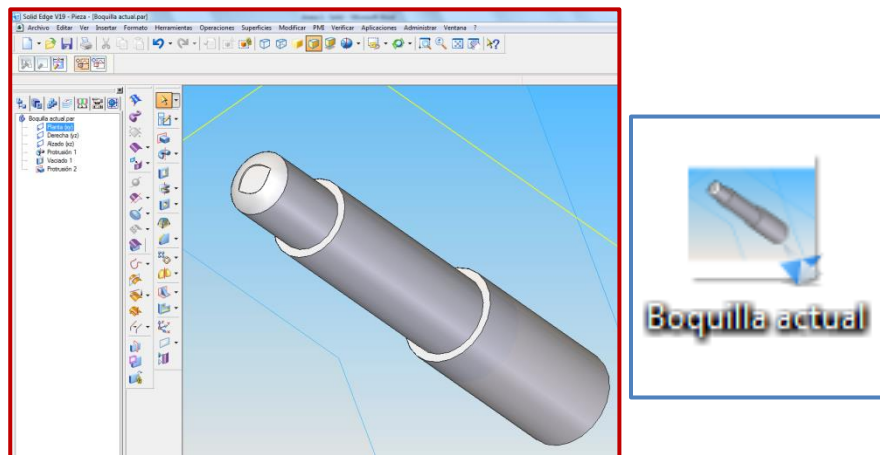


**Imagen 5.2.-** Modelado del orificio de salida. Se debe realizar en dos pasos de manera que el orificio quede como una superficie plana distinguida con aristas, con el fin de establecer las características en Fluent como las condiciones de contorno e iniciales

- 3) *Comprobar y guardar el modelo:* El modelo debe de ser comprobado, cosa que se puede realizar mostrando los bordes para ver que no hay aristas ni elementos extraños en el modelo. Después hay que comparar con la herramienta cota las dimensiones. Por último se debe de ir a la venta de las operaciones y obsevar que ninguna tiene un símbolo de advertencia o de error, lo cual trascendería a que Fluent no cargará la zona interna.



Después de realizar todas las comprobaciones, se debe de guardar el modelo con la extensión '.par', para asegurar la compatibilidad de la geometría entre ambos programas.



**Imagen 5.3.-** Modelo final e imagen de como debe aparecer el archivo en la ventana guardada en Windows

(Fuente del apartado 5.2.: Introducción al Solid Edge Jesús Meneses, Carolina Álvarez, Apuntes de asignatura la Diseño Industrial de Grado en Ingeniería Mecánica).

### 5.3. ANSYS WORKBENCH: FLUENT

A continuación se debe de usar un programa de simulación numérica de flujos para la resolución del problema fluido, caracterizado al interior de una boquilla. El programa que se usara será FLUENT, que pertenece al paquete de programas ANSYS WORKBENCH 14, que como se ha comentado basa su mecánica en la resolución de problemas con volúmenes finitos. Aunque este apartado esta descrito en el Anexo II, se explicarán y comentarán los aspectos más teóricos de la simulación.

Para comenzar hay que abrir el banco de trabajo de Ansys, que presenta la disposición de la imagen de abajo. En la venta de la izquierda se debe de localizar el programa Fluent, el cual habrá que arrastrar de la ventana de la izquierda a la derecha, a la ventana llamada 'Project Schematic'. Aparecerá un cuadro con el proyecto de la simulación. Este cuadro divide el proceso en varios pasos, por los cuales habrá que pasar uno por uno para la correcta simulación. Este cuadro de dialogo sirve como intercambio de información entre el usuario y el programa, debido a que Fluent es un programa inteligente que reconoce, calcula y asigna automáticamente parámetros. Es útil ya que en el caso de que hubiera un error en cualquiera de los pasos o de que hubiera algún detalle por definir el programa informaría mediante este cuadro y la venta inferior. Tras arrastrar a la derecha, deberemos asignar un nombre al cuadro y posteriormente guardar el proyecto. En los siguientes apartados se describirán los pasos a seguir para la simulación del modelo.

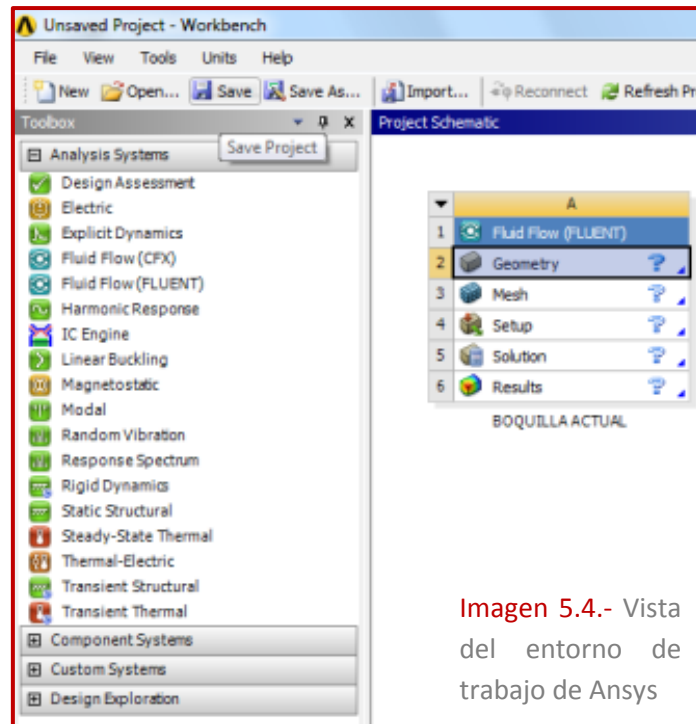


Imagen 5.4.- Vista del entorno de trabajo de Ansys

### 5.3.1. MODULO GEOMETRY

En él se define la geometría del problema. Para este caso la geometría será importada debido a que con este módulo sería complicado generarla. A parte, en él se debe nombrar las zonas donde después se aplicaran las condiciones de contorno de la zona fluida.

Para importar la geometría se puede hacer desde el Project Schematic o desde el propio módulo. Desde el Project Schematic, se debe clicar con el botón izquierdo sobre el paso 2, Geometry. Se abrirá una ventana en donde se debe clicar Import y buscar el archivo '.par' del modelo simulado con Solid. Una vez realizado este paso, si no hay problema aparecerá un 'tick' verde en lugar del símbolo de interrogación y el símbolo del programa Solid.

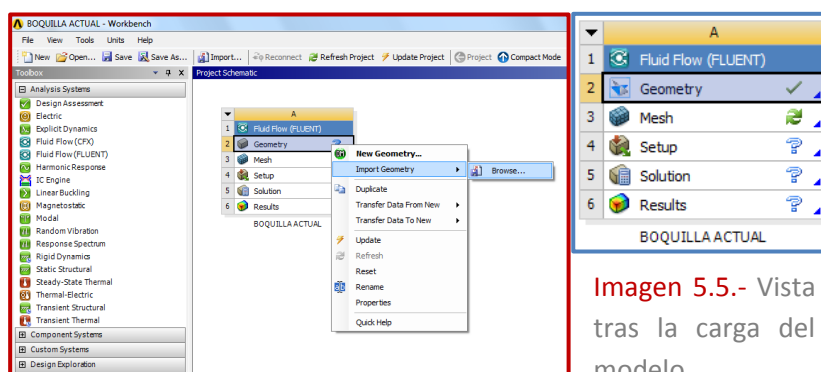
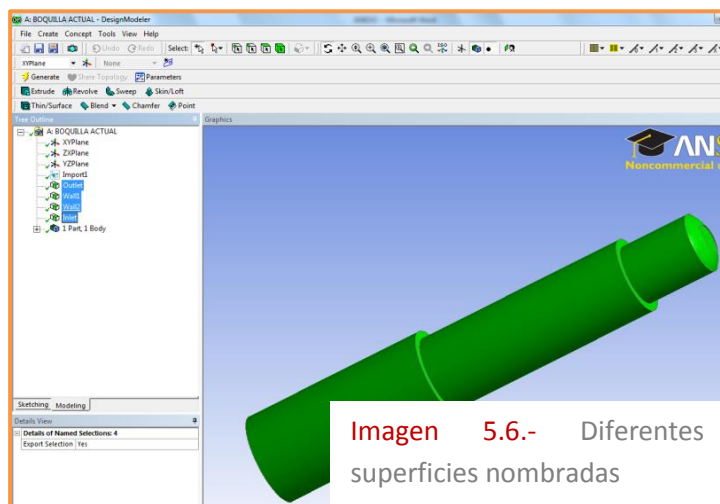


Imagen 5.5.- Vista tras la carga del modelo

Para la segunda parte en este punto, se deben nombrar las superficies, de manera que Fluent las reconozca cuando cargue el modelo. Para esto los nombres dados a cada superficie no son escogidos al azar, sino que deben escogerse según la función que vayan a tener en la posterior implementación al módulo Setup de Fluent. Una vez importado la geometría se debe de abrir el módulo Geometry. Tras pulsar el botón Generate, se puede ver el sólido creado, y para nombrar las zonas deberemos clicar con el botón izquierdo en cada superficie, y presionar Create Named Selection. Se deben nombrar tres tipos de zonas:

- *Zona tipo 'Inlet'*: hace referencia a la superficie de entrada, a través de la cual pasará el fluido con la presión de la instalación.
- *Zona tipo 'Outlet'*: hace referencia a la superficie de salida, a través la cual saldrá el fluido por el orificio de salida, y cuya presión será la atmosférica.
- *Zona tipo 'Wall1'*: el resto de superficie será modelado como tipo pared, a través de la cual el fluido no atravesará. Corresponde a las paredes cilíndricas. Es interesante separar esta superficie de la curva para poder estructurar después la malla, ganando precisión en la simulación.
- *Zona tipo 'Wall2'*: con las mismas características que la superficie anterior, también interesante mallar esta zona a parte ya que exigirá mas precisión, ya que es donde mayores fenómenos físicos ocurren (cambio de energía potencial a cinética).



Tras asignar los nombres, se debe guardar el proyecto y comprobar que al volver al Project Schematic sigue apareciendo el 'tick' verde.

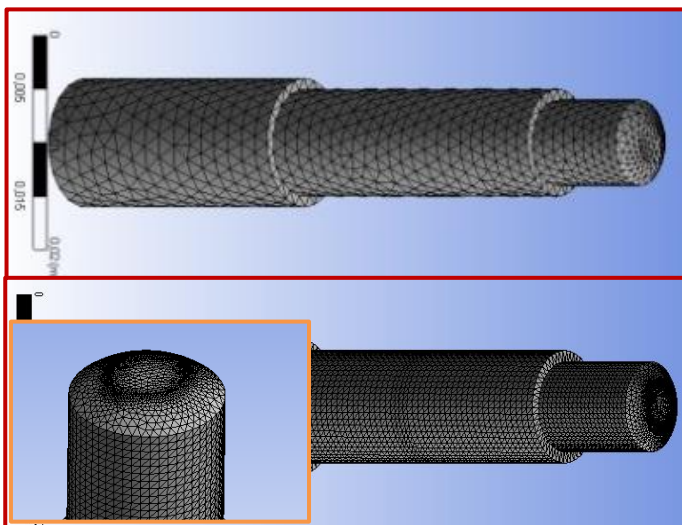
### 5.3.2. MODULO MESH ANSYS

En este módulo se malla el volumen sólido. Para ello es necesario, tras abrir el módulo Mesh, dar a generar malla. La malla que aparece es una malla simple. Para asegurar la eficacia de la malla es necesario refinarla.

Para definir la malla usaremos dos herramientas de mallado:

- *Sizing*: Que permite definir el tamaño de los elementos de la malla o el número de divisiones en líneas o superficies. Para este caso, en las aristas de los diámetros y en los dos arcos del orificio de salida se dispondrá que el número de divisiones mínimo sea de 50. Con esto la malla queda mucho más ajustada por la parte de la salida, y en las paredes, zonas de mayor interés de estudio. En el resto no hay variaciones significativas, por lo que no hace falta refinar en esa zona la malla.
- *Mapped Face Meshing*: Por otro lado es interesante hacer la malla lo más estructura posible para reducir el tiempo los cálculo y aumentar la precisión. Esta herramienta se deberá de aplicar a las caras cilíndricas, y superficies entre diámetros, correspondientes a Wall1.

Tras aplicar esta nueva malla se puede ver que el resultado es una malla mucho más ajustada y mejor dispuesta. Aunque reducir el tamaño de los elementos de la malla puede aumentar la precisión, puede incrementar el volumen de cálculo, y no por ello ser más efectiva. Además en la versión estudiante hay un límite de 512.000 celdas, por tanto, dejaremos la malla de con esta disposición que es la más interesante, con mayor número de elementos en el orificio de salida y estructurada, y después en el módulo Setup se realizará una valoración y un refinamiento de la misma.



**Imagen 5.7.-** Diferencia entre la malla por defecto del programa y la malla tras los retoques para refinarla. Se observa que en la zona del orificio de salida y en las paredes próximas a ella la malla es más fina. Se recomienda que esto sea así, ya que se prevé que en esa zona es donde se produzcan más cambios

### 5.3.3. MODULO SETUP

Una vez realizada la malla, y tras comprobar que aparece un 'tick' en ese paso, se pasa al módulo Setup. En él se establece las condiciones del problema, los parámetros previos al cálculo y como el criterio de convergencia de la solución. Este módulo aparte consta de pasos, que aunque algunos no son usados, hay que seguir para una correcta simulación.

#### Generals

Consta de dos apartados, Mesh y Solver. En este primero sirve para analizar la malla, aunque al abrir el módulo aparece la imagen de la malla y en los comentarios en la ventana inferior las características de la misma.

En el proceso de simulación la idea es resolver el problema con la malla actual, y una vez esté resuelto, para valorar la fiabilidad de la misma refinándola y volviendo a resolver el problema. Como se ha comprobado tras una previa simulación, es necesario un refinamiento de la malla, cosa de la que informa el programa al pulsar el botón de chequear la malla.

Para refinarla hay que irse a Adapt, Boundary Adapt seleccionar todos los componentes de la malla. Tras aplicar, en el cuadro de dialogo inferior se puede ver como el refinamiento se produce aumentando el número de elementos:

<i>Tamaño de la malla</i>	<i>Malla original</i>	<i>Malla adaptada</i>	<i>Incremento del nº de elementos</i>
<i>Celdas</i>	<i>93.170</i>	<i>195.006</i>	<i>101.836</i>
<i>Nº total de caras en las celdas</i>	<i>193.684</i>	<i>454.314</i>	<i>206.630</i>
<i>Nodos</i>	<i>19.294</i>	<i>64.625</i>	<i>45.331</i>

**Tabla 5.1.-** Componentes de la malla antes y después del refinamiento de la misma

Este refinamiento produce un valor de 0,5 l/s (en orden a resultados de 35 l/min) de diferencia en el caudal, y de 1m/s (del orden a resultados de 60 m/s), con respecto a la primera malla. Por tanto aunque tiempo de resolución aumenta, el error disminuye, y se puede tener en consideración refinar la malla. Tras intentar volver a refinar la malla el programa avisa de que el número de límite de celdas debe de ser inferior a 512.000 celdas en la versión académica. Por tanto la malla está en el límite de refinamiento, y los resultados que arroje se pueden considerar fiables, ya que una malla con menor calidad los resultados varían muy poco en el orden de magnitud del resultado.

En el apartado Solver, se definen parámetros de cómo va a resolverse el problema. Se deben marcar las casillas de:

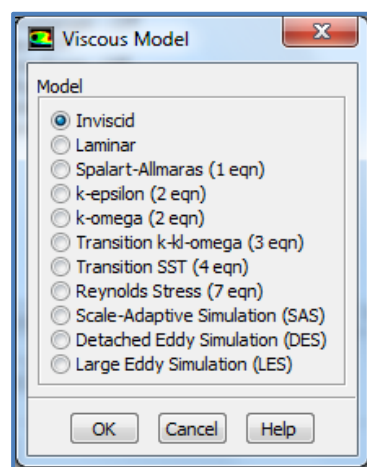
- *Pressure-Based*: debido a que es un líquido, y la solución de las ecuaciones se plantea en función a este parámetro.
- *Velocity Formulation Absolute*: debido a que no existen movimientos relativos en el problema
- *Steady*: ya que el problema se puede considerar estacionario. Lo que sucede es lo mismo en cualquier instante de tiempo.
- La gravedad en este caso no debe activarse ya que su efecto es despreciable para el problema.

### Models

Este apartado, se activan las ecuaciones que se van a resolver, además de las características del problema fluido. Para este problema hay dos de ellas que se deben comentar: la ecuación de la energía y el de la turbulencia.

La ecuación de la energía debe activarse en el caso de que interese conocer la evolución de la temperatura en el proceso. Para este problema esta evolución no es importante de conocer, solo la temperatura este en el rango. Como además la boquilla son 6,6 cm y el fluido pasa a gran velocidad, la caída de temperatura y el efecto de la misma se pueden asumir como despreciables. Tras la resolución del problema con la ecuación activada, y sin activar, el resultado de los datos de interés de este estudio, caudal y velocidad, es el mismo y por tanto se puede desactivar para reducir el tiempo de cálculo.

Por otro lado están las ecuaciones referentes a turbulencia, que por defecto modela el fluido como no viscoso (Inviscid). Es importante en este problema tener en cuenta que el régimen es turbulento y por tanto no se pueden despreciar los efectos viscosos, que afectarán al cálculo de velocidad y demás parámetros. Como el régimen es turbulento completamente desarrollado, se pueden aplicar tres modelos de turbulencia:

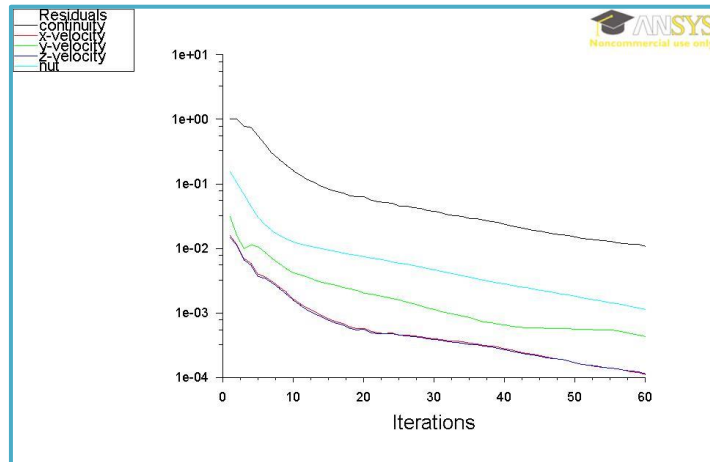


**Imagen 5.8.-** Modelos de viscosidad del fluido. El flujo tiene un elevado número de Reynolds, 127000 (Apartado 3.7), y como la zona de transición es entre 2000 y 5000, el flujo es completamente turbulento. Así pues se deberá asignar un modelo de viscosidad turbulenta desarrollada



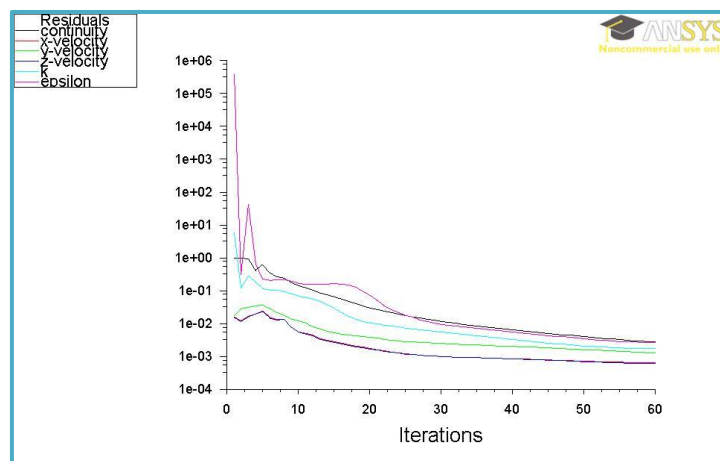
- Spalart-allmaras: Es un modelo que resuelve una única ecuación de transporte para definir una viscosidad variable,  $\nu$ . Esto puede ser referido como la variable Spalart-Allmaras. Es el modelo menos preciso.

**Imagen 5.9.-** Resolución del problema de la boquilla con el modelo viscoso Spalart-Allmaras. Al solo tener una ecuación, el error cometido es más grande en comparación a otros modelos de turbulencia, pero es el más simple y más rápido de calcular



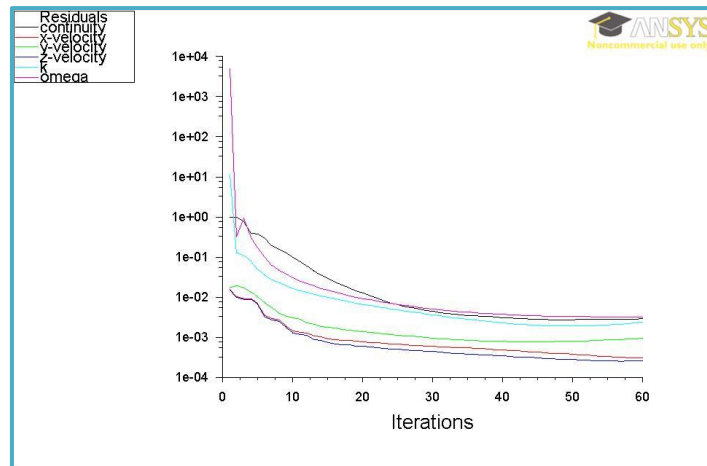
- K-epsilon: El modelo K-epsilon es uno de los modelos de turbulencia más comunes, a pesar de que no logra buenos resultados en los casos de grandes gradientes de presión adversos. Se trata de un modelo de dos ecuaciones, eso significa, que incluye dos ecuaciones de transporte adicionales para representar las propiedades de turbulencia del flujo. La primera variable de transporte es la energía cinética turbulenta,  $k$ . La variable segunda en este caso es la disipación turbulenta,  $\epsilon$ . Es la variable que determina la escala de la turbulencia, mientras que la primera variable,  $k$ , determina la energía en la turbulencia. Este modelo funciona algo mejor el k-omega con fluidos en contacto con paredes.

**Imagen 5.10.-** Resolución del problema de la boquilla con el modelo viscoso K-epsilon. Es el método que mejor resuelve zonas cercanas a la pared.



- K-omega: Es igual que el modelo anterior, solo que el segundo parámetro en este caso es la disipación específica,  $\omega$ . Esta también es la variable que determina la escala de la turbulencia. Este modelo funciona mejor con mezcla de fluidos que el modelo k-epsilon.

**Imagen 5.11.-** Resolución del problema de la boquilla con el modelo viscoso K-omega. Este método es menos preciso que el K-epsilon para este problema. Mejora la simulación en mezclas de fluidos y tuberías con ramales



Cualquiera de estos tres modelos pueden ser escogidos como modelo de turbulencia para el problema (**Fuente de teoría:** <http://www.cfd-online.com/>).

Tras realizar la simulación con los tres modelos, el que mejor precisión ofrece es el modelo k-epsilon. Al activar este modelo, se puede mejorar aún más la precisión al activar 'Enhanced Wall Treatment'. Esta característica del modelo mejora el modelado del fluido en la pared, muy importante debido a la estrechez del paso del fluido.

A la derecha aparecen los valores que asumen los parámetros de las ecuaciones de turbulencia. En la ayuda que proporciona Fluent, esta comentado que estos valores son válidos para flujos turbulentos fundamentales, como el flujo interno con cizallamiento de pared, que es lo que ocurre en la zona fluida de la boquilla. Además comenta que los valores predeterminados de las constantes del modelo son los habituales y de mayor aceptación. (**Fuente:** Manual de ayuda de Fluent), (**Fuente:** Libro *Lectures in Mathematical Models of Turbulence* de los autores B. E. Launder and D. B.)

Por tanto se dejaron los valores predeterminados de las constantes del modelo. Tras haber definido estos parámetros de la ecuación, se comprueba que del modelo de turbulencia está activado, en la ventana de fuera.

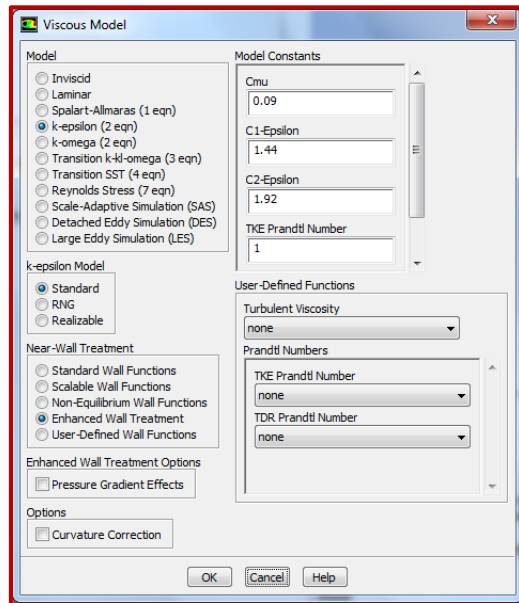


Imagen 5.12.- Detalle del modelo de turbulencia K-epsilon escogido

## Materials

El apartado sirve para definir los materiales que intervienen en el problema, ya sea sólido, líquido o gaseoso. En este caso el material que interviene es agua. El fluido por defecto es aire, por lo cual hay que cargar las propiedades del agua de la base de datos o introducirlo manualmente. Las propiedades del agua de la base de datos son de 25°C, mientras que las propiedades obtenidas en puntos anteriores del trabajo son a 60°C. Al haber desactivado la ecuación de la energía, los parámetros del agua que se usan son la densidad y la viscosidad, que apenas varían entre ambas temperaturas. Tras resolver ambos casos, el resultado es similar de los parámetros de interés. Por tanto, para las simulaciones de varios tipos de boquillas para las gráficas y las comparaciones se usarán las propiedades de la base de datos del agua que proporciona la base de datos de Fluent. En el caso del modelo final se deberá introducir la densidad y la viscosidad del fluido a 60°C, del punto 3.5. del trabajo.

## Cell Zone Conditions

En este paso se debe de asignar el material a la zona interior o fluida. Como el programa automáticamente reconoce esta zona al abrir el programa y cargar el modelo, no hay nada más que seleccionar la zona interior, y al abrirse la ventana del menú desplegable de propiedades se debe escoger el material adecuado, en este caso el agua.

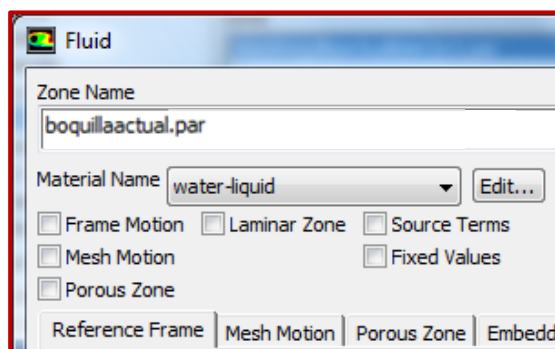


Imagen 5.13.- Se debe asignar el agua como material de la zona interior del modelo

## Boundary Conditions

El paso siguiente, es establecer las condiciones de contorno. Al abrir este módulo Setup, aparece la malla con zonas blancas, que son la pared, una zona roja que es la salida del fluido y una azul que es la entrada que el programa reconoce automáticamente al cargar el problema. A la izquierda aparecen todas las partes que componen el modelo.

Estas serán las superficies que se deberán caracterizar:

- **Inlet:** es la entrada, de ella se conoce como dato que la presión son 20 bares. El cuadro de diálogo permite basar la presión como absoluta o manométrica, y relativa. Por tanto como se sabe que en la salida, la presión es la atmosférica, 1 bar, como valor de presión absoluta pondremos los 19 bar, la diferencia entre ambas. Para ello, hay que seleccionar la salida como tipo Pressure Inlet, y se deberán introducir el valor de los 10 bar en Pascales, que son 1.900.000 Pa.

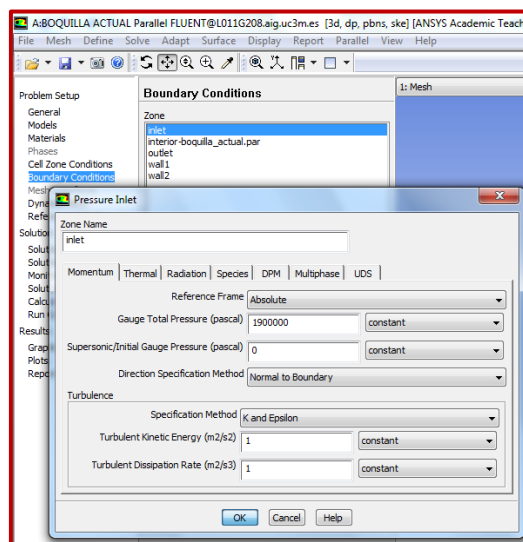


Imagen 5.14.- Ejemplo de cómo se caracteriza la superficie de entrada Inlet, como Pressure Inlet y se da el valor de la presión como diferencia entre la entrada y la salida

- **Outlet:** La salida, como ya se ha comentado antes, el agua en el momento que abandona la boquilla y se pone en contacto con el ambiente, la presión decae hasta la atmosférica. Como se conoce la presión se establece como Pressure Outlet. Debido a que ya se ha tenido en cuenta la diferencia de presión, el valor que se debe de establecer es el de 0 Pa.
- **Wall1:** es la pared circular, se debe tratar como wall.
- **Wall2:** es la pared recta, se caracteriza como wall también.
- **Interior-boquillaplana.par:** hace referencia la malla interna, creada por defecto por el programa. El programa ya la establece por predeterminado como interior, a la que asignamos el agua como fluido que compone esta zona.

## Monitors

Tras estos pasos, queda por establecer los parámetros del cálculo. Todos los criterios están en 10-4, un criterio bastante restrictivo. Es necesario cambiar el criterio de convergencia de la turbulencia, del parámetro  $k$  y el  $\epsilon$ , ya que a veces el modelo no puede ofrecer más precisión de 10-3 y se queda oscilando entre estos valores. Esto se debe a que simular un flujo turbulento es muy complicado, ya que es un flujo aleatorio por la propia naturaleza del régimen turbulento.

## Solution Initialition

Es donde se establecen las condiciones iniciales del problema y además se puede proponer al programa valores para reducir el tiempo de cálculo, intuyendo cómo se comportará el problema. Esta versión cuenta con una herramienta llamada Hybrid Initialition, la cual realiza un cálculo previo de la solución mediante iteraciones y así establecer un rango en la búsqueda de la misma y reducir el volumen de cálculo. Para realizar este paso, no hay más que pulsar el botón Initialition.

## Run calculation

En este apartado se debe de establecer un límite de iteraciones para el caso en que no converja el problema. Por defecto aparece 100 y pondremos 250. Tras elegir el número de iteraciones, no hay más que dar a calcular. Y una vez hecho esto ponemos el número de iteraciones y calculamos. El programa calculará pues, hasta encontrar valores por debajo del error pedido o se llegue al número de iteraciones. El problema converge en la iteración número 158. El problema estará resuelto bajo las condiciones de simulación y límites de error marcados.

## 5.3.4. MODULO RESULTS

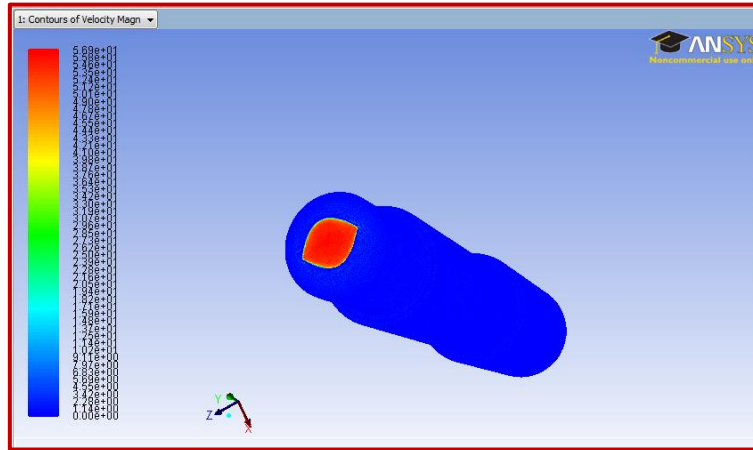
A este módulo se puede llegar de dos formas. Se pueden acceder a los resultados dentro del propio módulo Setup o desde el Project Schematic. En ambos aunque cambia la interfaz, los procesos son los mismos para la obtención de los datos. De este módulo hay que sacar dos datos importantes de la simulación principalmente:

- Para el cálculo de caudal, hay que hallar el valor del gasto másico. Hay que irse a Fluxes, y en Mass seleccionar Inlet y Outlet. El programa mostrará los datos en el cuadro de diálogo. El resultado del gasto es en kilogramos por segundo, se debe de pasar de kg/s a l/min y así se obtendrá el caudal. El caudal obtenido es de 35,21 l/min. Como el dato obtenido de manera real es de 35 l/min de media, el modelo de simulación de la boquilla es correcta.

Mass Flow Rate	(kg/s)
inlet	0.58672509
outlet	-0.58713936
Net	-0.0004142636

**Imagen 5.15.-** El cálculo del gasto másico lo muestra el programa en la ventana inferior. Para pasar de kg/s a l/min hay que multiplicar el gasto másico por 60. Net es la diferencia de flujo de masa entre la entrada y la salida, que al ser considerado estacionario debe de ser 0

- Para obtener el valor de la velocidad, no hay más que ir a Graphics and Results, y seleccionar Velocity. El valor máximo exacto aparecerá en la tabla y además se puede observar gráficamente. La velocidad obtenida es de 204,84 km/h.



**Imagen 5.16.-** Así se muestra la velocidad en la boquilla. A la izquierda en la leyenda se ven los valores de la velocidad asociados a cada color. El máximo se da en el orificio de salida, que como toda la superficie tiene el mismo color, se puede considerar uniforme. Como el resultado está en m/s, se debe multiplicar el valor por 3,6 para obtener el resultado en km/h

## 5.4. VALORACION Y FIABILIDAD DE LOS RESULTADOS

Debido a la propia naturaleza del proceso escogido para afrontar el problema, el resultado que se obtiene viene condicionado por las simplificaciones aplicadas al planteamiento, como los propios errores en el cálculo del proceso iterativo. Es decir, es tan importante o más el número del resultado final como tener en cuenta en el contexto en el que se produce. Los principales parámetros a tener en cuenta para valorar la fiabilidad del resultado son tres:

- *La resolución de la malla:* La malla, consta del valor máximo optimizado, siguiendo el proceso descrito en el apartado 5.3. Esto hace que aunque aumente el volumen de operaciones para la resolución del problema, debido a que aumenta el número de celdas a resolver, se consigue disminuir el error asociado al cálculo de la solución. Los pasos para saber si la malla es adecuada, es a la malla creada en el módulo Mesh, en el módulo Setup se debe de refinar, como bien se ha explicado en el apartado explicado en este punto citado anteriormente en el apartado 5.3.

Para saber la precisión de la malla se puede chequear la malla al abrir este módulo. Tras conocer la solución con la malla primitiva, se refina la malla y se vuelve a ver los valores solución y se comparan. Si no hay diferencia significativa entre los valores de ambos resultados, la malla se puede considerar apta.



Por otro lado hay que tener en cuenta la limitación máxima de celdas de una malla de la versión académica de Fluent, 512.000. Por tanto la solución estará condicionada por la precisión del problema por un lado y el límite de celdas por otro. En el proceso de entre refinamientos consecutivos de la malla hay que comparar los resultados y casi no varían, se puede considerar que la malla es precisa.

- *Criterio de convergencia del cálculo:* Se establecen los límites de precisión de la solución. Estos criterios ya comentados dan una idea de la exactitud que se requiere en el problema, pero hay que establecer un valor medio entre aumentar la precisión y volumen de cálculo ya que cuanto más precisión mas iteraciones para la resolución serán necesarias. Este criterio esta comentado en la página 82, donde se aprecia que los errores permitidos son del orden de  $10^{-4}$  menos en la turbulencia que como es un modelo de aproximación la precisión se mantiene en  $10^{-3}$ .
- *Errores:* En este tipo de problemas de simulación y cálculo por iteración, con los valores de los parámetros de la solución calculados por el programa, se debe dar el error asociado cometido. Es tan importante el número de la solución, como hacer una valoración de en qué circunstancias se produce.
- *Simplificaciones del modelo:* Como bien se ha citado el error, es muy importante tener una idea general de que está pasando en la solución del problema. Es crítico a la hora de dar fiabilidad al resultado. En este problema, por ejemplo, hay que tener en cuenta de que la variación de presión a la entrada puede variar y de que aunque todas las simplificaciones, como que el líquido es incompresible, aunque estén justificadas puede ser motivo de que los valores en la simulación varíen con los obtenidos en la realidad.

Este punto, es necesario comentarlo detenidamente sobre el modelo que se propondrá para saber la fiabilidad de los parámetros obtenidos como solución. Estos puntos serán valorados numéricamente en el apartado 8.5. Y comentados. El fin será conocer el contexto en el que se produce el resultado, tener una idea de la precisión y valorar la fiabilidad de la solución obtenida.

## 5.5. TUTORIALES PASO A PASO

Al final del trabajo hay tres anexos, en lo que se encuentran descritos de manera exhaustiva todos los pasos a seguir en el modelado de la boquilla. Se trata de una guía para realizar los modelos desde cero. En ellos se demuestra cómo se ha modelado la boquilla actual, desde el modelo sólido hasta la comprobación de que el caudal es el mismo experimentalmente que el ofrecido por el ordenador.

## 6. DISEÑOS Y COMPARACION DE LA BOQUILLA

---

### 6.1. RESUMEN DEL PROCESO DE DISEÑO

El proceso de diseño se basará en la comparación de los parámetros de una boquilla, para definir las características del modelo final.

Para ello, el procedimiento será primero realizar modelos con varios tipos de pared, manteniendo constantes los diámetros de entrada y del orificio de salida. Esto servirá para deducir que tipo de pared es el más efectivo, con la que más se acelere el fluido y menos pérdida de carga sufra.

Una vez escogido el modelo, se estudiarán los parámetros de la boquilla, los cuales se compararán para obtener el diseño más efectivo:

- *Caudal de la boquilla*
- *Velocidad de salida*
- *Área del orificio de salida*
- *Área de proyección*
- *Efectividad de limpieza*

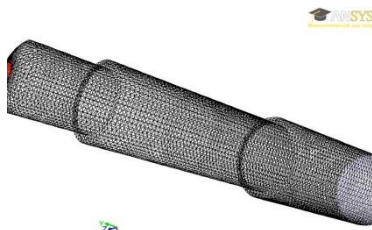
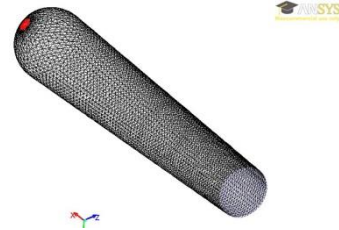
Aunque los parámetros importantes son el caudal y la velocidad, los demás parámetros pueden ayudar a la elección del mejor diseño.

### 6.2. ESTUDIO DE LAS DIFERENTES PAREDES DE BOQUILLA

Como se ha explicado, manteniendo fijos todos los parámetros de la longitud y los orificios de entrada y salida, se ha procedido a la simulación de modelos con paredes diferentes, y se han tabulado los resultados. El parámetro denominado como rendimiento, hace referencia a la división entre el parámetro que se desea mejorar, la velocidad y lo que penaliza el diseño, el caudal. Con este punto de vista, la pared con mayor rendimiento será en la que menos pérdida de carga de presión se pierda, aunque realmente no cuantifique este parámetro ningún valor.

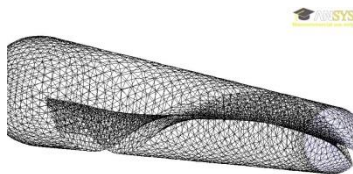
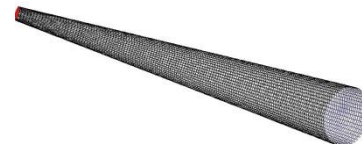
A continuación se muestra las mallas de la zona fluida de las diferentes boquillas. Las paredes modeladas son:

- *Boquilla simple semicircular:* zona interior simplificada. Tiene forma circular la salida para facilitar la salida del agua a presión.



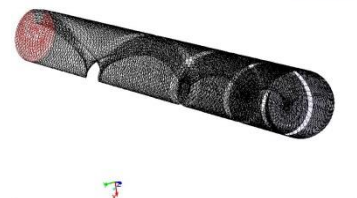
- *Boquilla cambio de secciones:* Para evitar un posible exceso de pérdida de presión por la acumulación de fluido, el fluido va siendo acomodado a la reducción de diámetro con las contracciones sucesivas. Además en la salida consta de una pared curva para facilitar la salida del agua.

- *Boquilla cónica:* El fluido se va acomodando según la progresiva reducción de diámetro.



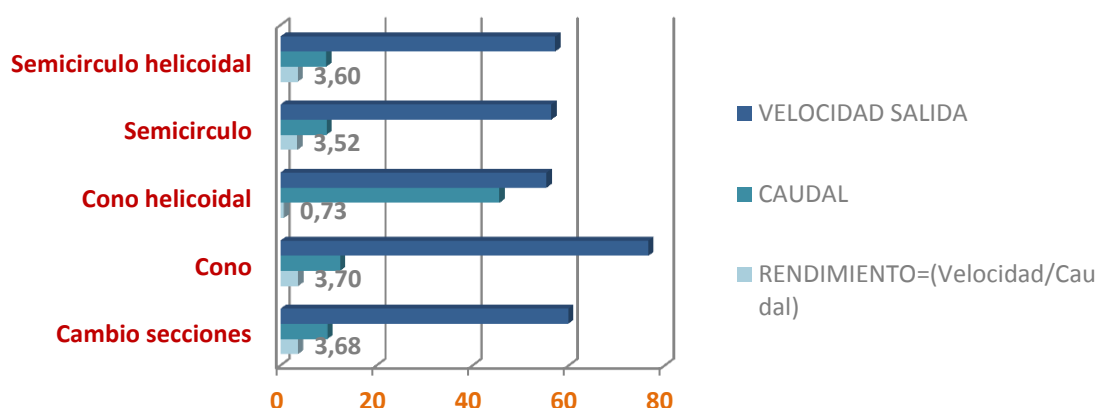
- *Boquilla simple semicircular helicoidal:* Basada en la boquilla simple con una protusión helicoidal con el fin de dar rotación al fluido y acelerarlo.

- *Boquilla cónica helicoidal:* Basada en la cónica con una protusión helicoidal con el fin de acelerar y dar rotación al fluido que ayude a la limpieza.



Todos estos modelos tienen longitud 66 mm, diámetro de entrada 12 mm y de salida 4 milímetros. La mayoría de los modelos de pared son los más recomendables y usadas en el diseño de terminales o difusores (Fuente: libro 'Applied Fluid Dynamics', del autor Robert D. Blevins). A continuación se muestra los resultados de las simulaciones de los modelos en una gráfica comparativa:

**Grafica 6.1.-** La siguiente gráfica muestra los principales parámetros de cada modelo con diferentes paredes.



Así pues, la pared con mejor ratio mayor velocidad y menor caudal será la pared con forma de cono. Por tanto aunque el resultado de este apartado no es cuantificable, si da una idea de que usar una pared que proporcione una disminución progresiva del diámetro presenta mejor comportamiento que una pared lisa o con forma helicoidal. Entre las paredes de disminución progresiva están la cónica y la pared con tres contracciones bruscas, que al tener tres aristas vivas que influye en velocidad y pérdida de carga en el fluido. Aun así se puede observar que la diferencia entre ambos casos no es muy grande, ya que en las contracciones el fluido acabara en ella dibujando un cono por el borde extremo del cambio de diámetro, que acabara conformando un cono. En los huecos el fluido se frenará, al estar en contacto con el agua, los efectos viscosos provocaran algo más de pérdida de carga, que marcar la ligera diferencia entre ambos modelos.

Por tanto de estas simulaciones no se puede descartar ninguno de los dos modelos de pared. En principio se debería usar la pared cónica, pero este criterio no es definitivo de rendimiento. Habría que valorar otros criterios, como por ejemplo si boquillas con este tipo de pared se encuentran en catálogos o se deben de hacer por encargo, lo que incrementaría el coste y la disponibilidad de recambios del terminal.

### 6.3. COMPARACION DE LOS PARAMETROS DE LIMPIEZA

Para la seguir con el estudio del diseño y realizar comparaciones, se ha escogido la pared tipo cono, con el fin buscar el mínimo el caudal y la mayor velocidad. Para el diseño óptimo del orificio de salida, lo que se hecho es con determinadas formas de abertura escogidas, probar con varios tamaños de orificio, simularlos y tabular los resultados.

Las formas escogidas son (Fuente: Fundamentals of Fluid Mechanics, del autor, y el libro Applied Fluid Dynamics):

- Abertura circular
- Abertura con forma elipsoidal, aunque realmente debido al proceso de fabricación no es una elipse, son dos arcos de circunferencia. La diferencia reside en que los extremos tiene forma de esquina en lugar del radio menor de una elipse. Pero para el nombre que recibirá será abertura con forma de elipse o elipsoidal.
- Abertura plana

Para la comparación, como ya se ha comentado los datos que se deben obtener son la velocidad en la salida, y gasto másico, que será el consumo. Pero no se puede tabular estos parámetros directamente, debido a que para poder comparar con certeza estos parámetros, se hace necesario una valoración del área de salida, un parámetro vital a la hora de la limpieza. Si esto no fuera así, un orificio muy pequeño tendría mucha velocidad y muy poco caudal, pero no es útil a la hora de limpiar porque el área será muy pequeña.

Por este motivo se harán comparaciones del consumo de agua y de la velocidad frente al área del orificio de salida, para cada tipo de orificio y cada tamaño. Además en estas graficas se representarán la boquilla que se usa actualmente que será útil para saber a partir de qué punto mejoran las condiciones de limpieza. A continuación se muestran los datos de las simulaciones realizadas para los diferentes casos:

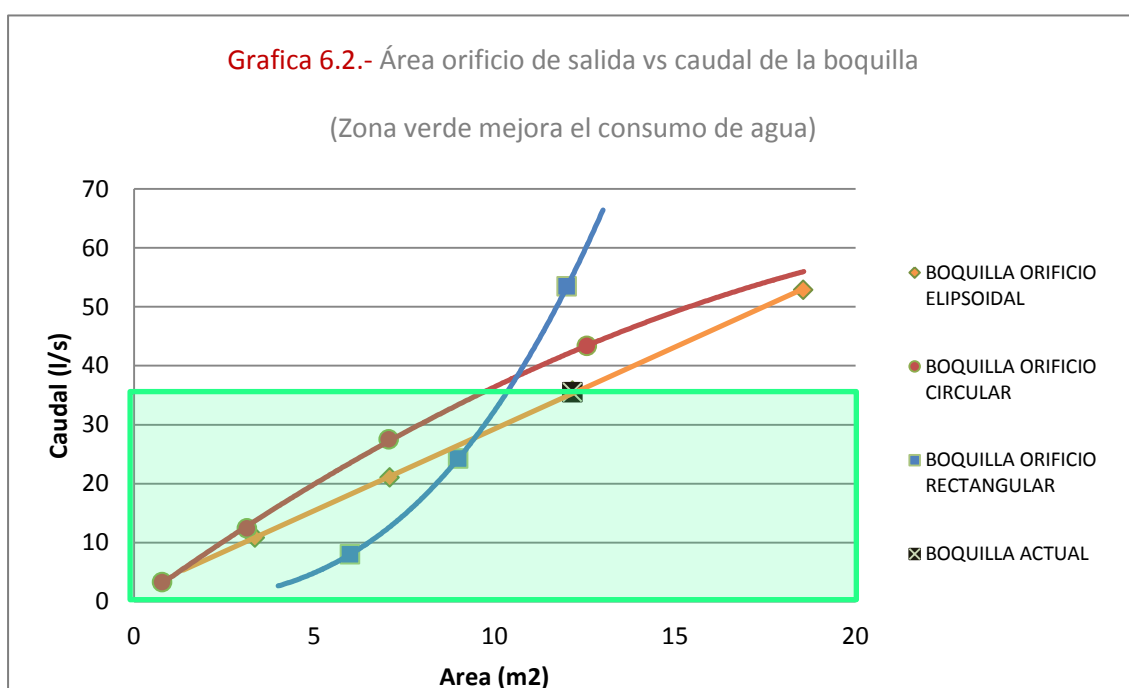
BOQUILLA ORIFICIO ELIPSOIDAL					
BOQUILLA	AREA ORIFICIO	GASTO(kg/s)	CAUDAL (m3/s)	VELOCIDAD (m/s)	RENDIMIENTO=(Velocidad/Caudal [m2])
1,8x2,8mm	3,36	0,1803	10,818	62,8	3,48
2,8x3,8mm	7,093333333	0,351	21,06	57,3	1,63
3,8x4,8mm	12,16	0,5956	35,736	56,4	0,95
4,8x5,8mm	18,56	0,8808	52,848	60,2	0,68
BOQUILLA ORIFICIO CIRCULAR					
BOQUILLA	AREA ORIFICIO	GASTO(kg/s)	CAUDAL (m3/s)	VELOCIDAD (m/s)	RENDIMIENTO=(Velocidad/Caudal [m2])
D=1mm	0,7854	0,0551	3,306	77,5	14,07
D=2mm	3,1416	0,2068	12,408	76,6	3,70
D=3mm	7,0686	0,4581	27,486	73,7	1,61
D=4mm	12,5664	0,7231	43,386	58,5	0,81
BOQUILLA ORIFICIO RECTANGULAR					
BOQUILLA	AREA ORIFICIO	GASTO(kg/s)	CAUDAL (m3/s)	VELOCIDAD (m/s)	RENDIMIENTO=(Velocidad/Caudal [m2])
0,5x6mm	3	0,13409	8,0454	62,8	4,68
1x6mm	6	0,133905	8,0343	55,4	4,14
1,5x6mm	9	0,40405	24,243	60,1	1,49
2x6mm	12	0,8912	53,472	73,2	0,82
BOQUILLA ACTUAL					
BOQUILLA	AREA ORIFICIO	GASTO(kg/s)	CAUDAL (m3/s)	VELOCIDAD (m/s)	RENDIMIENTO=(Velocidad/Caudal [m2])
3,8x4,8mm	12,16	0,5916	35,496	56,13	0,95

**Tabla 6.1.-** Datos tubulado de cada simulación, usados en las posteriores gráficas 6.1. y 6.2.

Ahora bien, el área de salida, que será el área de proyección del chorro, servirá como comparación de las diferentes boquillas. Será así con el fin de establecer una comparación coherente. Así pues, se mostraran a continuación dos gráficas, área del orificio de salida frente a la velocidad de salida, y área del oficio de salida frente a la velocidad.

### 5.2.1. CAUDAL FRENTE AL AREA DEL ORIFICIO DE SALIDA

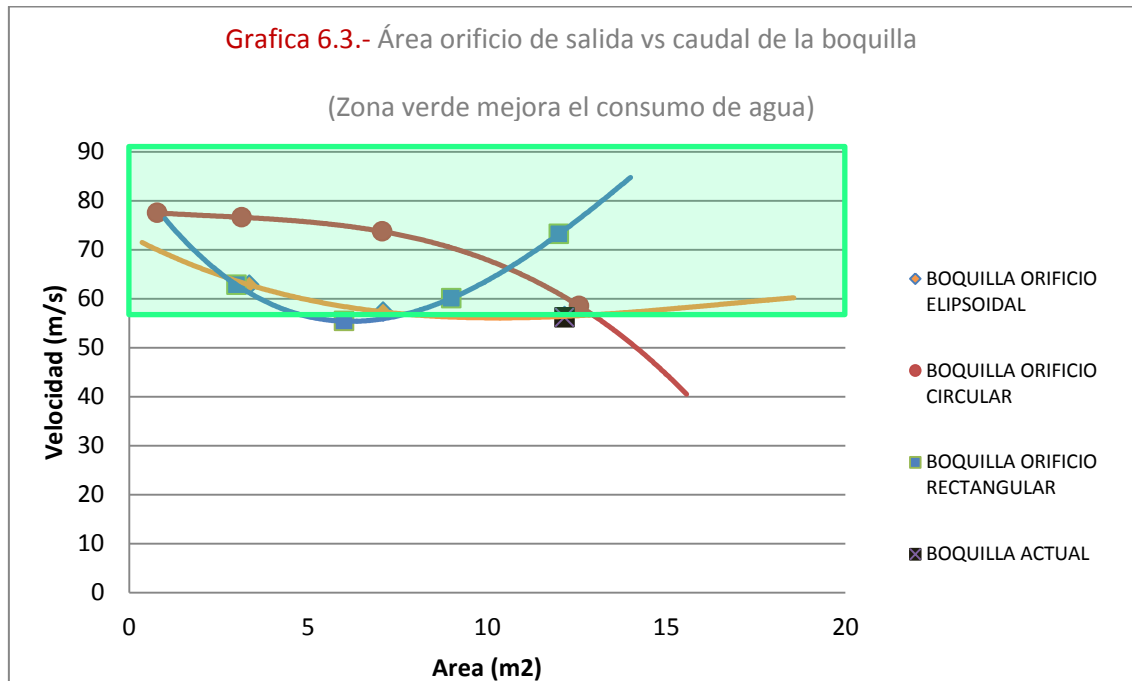
En la siguiente gráfica, en diferentes colores están expresados los orificios, como se puede ver en la leyenda. El comportamiento de la boquilla no varía linealmente. Para predecir el comportamiento, los puntos de cada serie del tipo de orificio hay que ajustarlas polinómicamente. En negro se encuentra el modelo usado actualmente. Trazando una horizontal por ese punto, por debajo de esa línea el caudal será optimizado.



Mencionar que la boquilla circular da un resultado muy parecido, ya que el orificio de salida es el mismo y la diferencia entre ambas es la pared. La diferencia es inapreciable en la escala entre la pared circular y la pared con contracciones bruscas (recordar que la diferencia en el 'rendimiento' era muy parecida al comparar las paredes). Por otro, se debe tener en cuenta la boquilla actual es la que más área de limpieza ofrece para el caudal de 35 l/min.

### 6.2.2. VELOCIDAD FRENTE AL AREA DEL ORIFICIO DE SALIDA

En esta gráfica anterior, se han representado el área frente a la salida de cada boquilla en función de los orificios de salida. El procedimiento es el mismo seguido que en la gráfica anterior.



Para poder establecer tener una referencia para la comparación, se debe representar la boquilla actual. Igual que ocurría en el apartado anterior, la simulación queda bastante parecida de ambas paredes. Al trazar una horizontal por la velocidad de la boquilla actual, vemos que la velocidad de salida es la más baja de todas.

En resumen a ambas gráficas, observando la boquilla actual, el caudal es el más bajo pero a costa de tener la velocidad más baja. Es tan importante el consumo como la velocidad, ya que un valor bajo reduce la potencia de la limpieza e incrementa el tiempo de uso de la manguera.

### 6.2.3. COMPARACIÓN DEL AREA DE LOS DIFERENTES ORIFICIOS DE SALIDA

Como el área de salida es un parámetro importante de diseño, es necesario evaluar este parámetro aparte. Para la comparación del área, realizaremos tres diseños de orificios con el mismo valor de área y para compararlas se pondrán con un mismo patrón.



El valor del área escogido es del área del orificio de la elipse de la boquilla actual, cuyo valor es de  $12,16 \text{ mm}^2$ . Aunque el área de una elipse no es exacta, se aproxima bastante al valor real del orificio, ya que en el módulo Geometry se puede conocer el valor de la superficie, cuya área es de  $12,38 \text{ mm}^2$ .

$$Area_{elipse} = \frac{2}{3}(4,8\text{mm} \cdot 3,8\text{mm}) = 12,16\text{mm}^2$$

$$Area_{circulo} = \frac{\pi \cdot (3,93\text{mm})^2}{4} = 12,16\text{mm}^2$$

$$Area_{rectangulo} = 6\text{mm} \cdot 2,02\text{mm} = 12,16\text{mm}^2$$

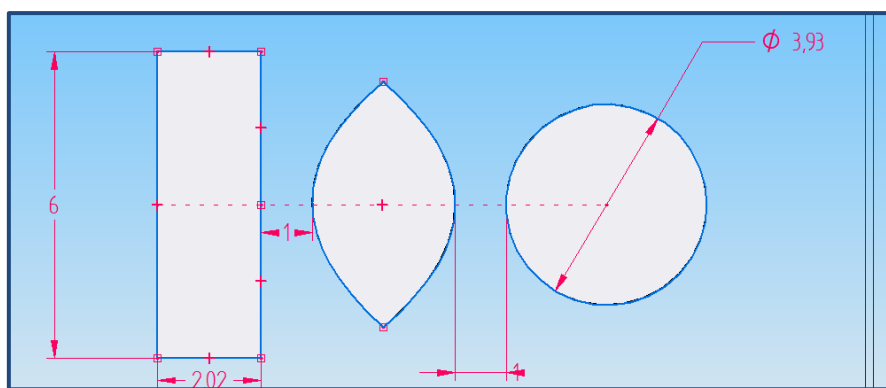


Imagen 6.1.- Áreas de los diferentes orificios de salida

Para valorar estas áreas, sobre una pared con un patrón se han dispuesto las diferentes áreas para hacer una valoración un poco más certera con del potencial de limpieza de las diferentes opciones.

### BOQUILLA ORIFICIO ELIPSOIDAL



Imagen 6.2.- Patrón de boquilla de orificio elipsoidal

### *BOQUILLA ORIFICIO CIRCULAR*



**Imagen 6.3.-** Patrón de boquilla de orificio circular

### *BOQUILLA ORIFICIO RECTANGULAR*



**Imagen 6.4.-** Patrón de boquilla de orificio rectangular

Tras estas comparaciones, en las cuales el patrón entre formas es constante, se aprovecha menos el área en la boquilla con forma de elipsoide, ya que hay menos zona superpuesta, y se puede predecir que la potencia de limpieza será menor. Por otro lado el orificio circular y rectangular poseen mejores patrones. Al compararlos se puede ver que la boquilla de orificio rectangular es ligeramente mejor, ya que con mismo área la zona de superpuesta está más repartida y la superficie de limpieza se aprovecha más.

#### 6.2.4. EFECTIVIDAD DE LIMPIEZA

Para eliminar los restos y desperdicios es mejor un chorro plano, ya que más cómodo retirar la suciedad mediante barridos. Esto es en oposición frente a chorros circulares que puede dar lugar a que se vuelvan a esparcir los residuos. Esto da además un valor añadido desde este aspecto a la limpieza con boquillas planas. Para ejemplificar este aspecto, en la imagen de la izquierda se observa como un chorro circular se abre de manera radial y la izquierda una lanza de presión de chorro plano para limpiar barro y la suciedad entre las piedras. Retirar la suciedad es más complicado con un chorro circular, ya que se esparce la suciedad, mientras que con una boquilla plana tener mayor control de residuos.



**Imagen 6.5.-** A la izquierda un chorro circular y a la derecha un chorro plano. Para operaciones de limpieza a presión son mejor estos últimos, ya que permite hacer barridos y tener más precisión en la limpieza

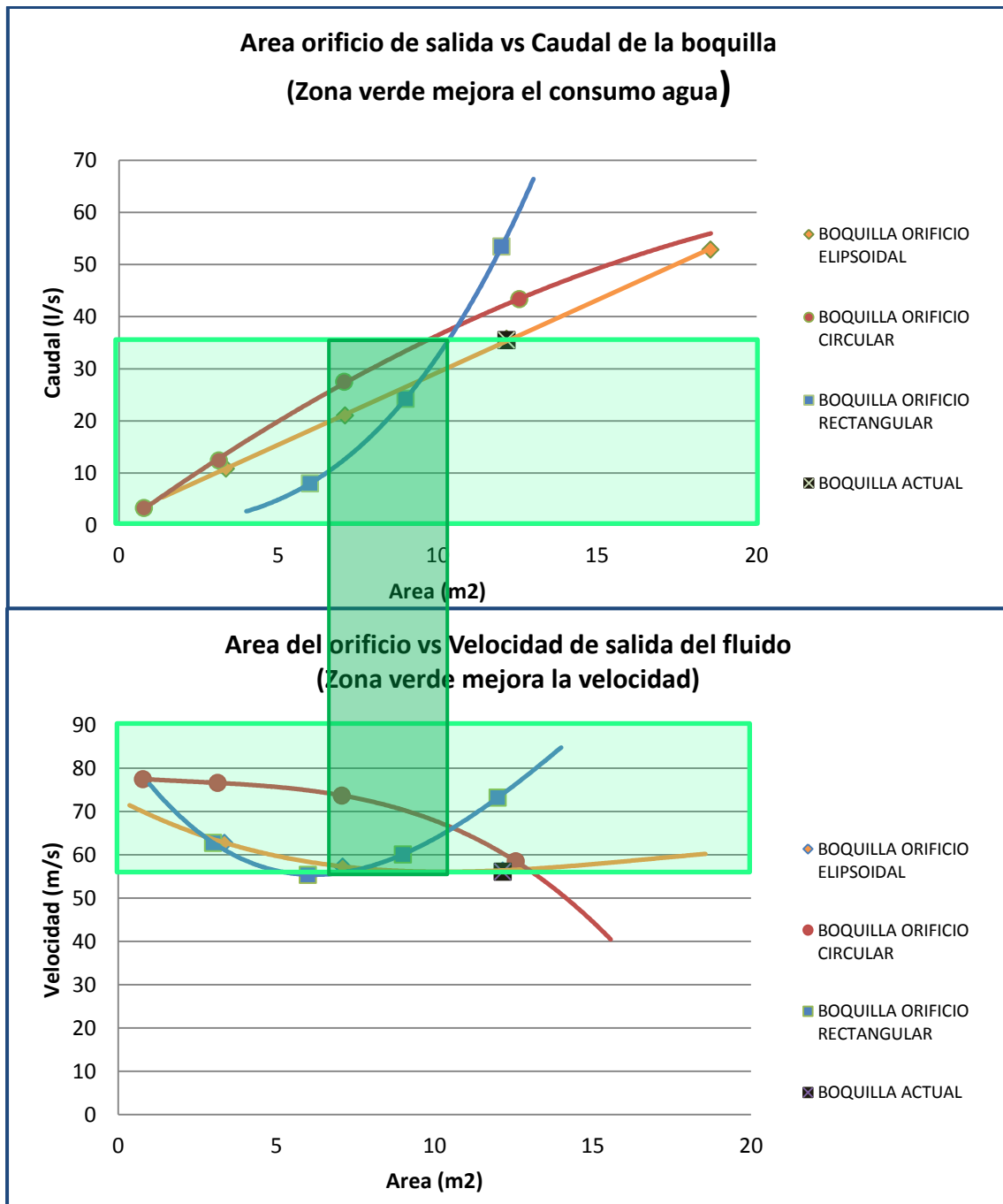
### 6.4. CONSIDERACIONES DEL MODELO ESCOGIDO

Recapitulando y reuniendo la información obtenida, se sacan las siguientes conclusiones:

- Es factible la caracterización propia de la boquilla en lugar de comprarla a granel, o conformarla uniendo partes estandarizadas, debido a que el coste de fabricación es pequeño en lugar de la importancia del ahorro. También se debe tener en cuenta el que el proceso de fabricación del modelo es importante. Esto es ya que si el modelo está catalogado reduce el precio de adquisición y la facilidad de reposición de los terminales.
- El consumo de agua debe de ser menor de los 35 l/min, sin perder velocidad de limpieza y mejorándola en el caso de que se pudiese.

- La pared que presenta menos oposición al paso del fluido, es con forma cónica o similar, es decir una reducción entre el diámetro mayor de entrada y el menor de salida, suave y progresiva. El diseño con contracciones bruscas es ligeramente peor, pero si hubiera en catálogo este modelo también sería factible.
- Una buena elección en vista a el área que cubre el chorro son los orificio circular y rectangular, cubriendo este ultimo la pared de manera más uniforme
- Un chorro plano facilita las operaciones de limpieza, ya que permite realizar barridos y se tiene más precisión en la operación de limpieza.

Las siguientes gráficas corresponden a las de los apartados anteriores. Así pues el rango en **verde oscuro** corresponde rango en el que cualquiera de los modelos contenidos mejora los parámetros de velocidad y caudal:



**Graficas 6.2. y 6.3.-** El rectángulo verde oscuro representa los modelos de boquilla que optimizan la velocidad y el caudal frente al obtenido con el diseño de terminal actual.

Así pues, se saca como conclusión que la el mejor diseño es el de boquilla plana. El modelo elegido escogido es la simulación de una boquilla de chorro plano, de área en torno a 9-9,5 m<sup>2</sup>. Una boquilla de estas características lograría reducir el consumo de agua de los 35 l/min a 21-25 l/min. Esto por un lado, pero por otro se reduciría el tiempo de limpieza gracias al aumento de velocidad de salida y por tanto aumentará el potencial de higiene.

Con este modelo además se aprovecharía más el área proyectada del chorro. La idea es que una disminución del área de salida no afecte de manera significativa a la potencia de limpieza. Y por último hay que tener en cuenta que un chorro plano facilita mucho la limpieza, que es otro dato a tener en cuenta para disminuir el tiempo de limpieza.

Después de modelar varios modelos de boquilla de orificio rectangular, el orificio óptimo escogido es de 1,58 mm x 6 mm, con un área en la salida de 9,48 mm<sup>2</sup>.

# 7. DISEÑO Y COMPARACION DE LA BOQUILLA

## 7.1. MODELO PROPUESTO. PLANOS

El modelo final escogido como propuesta al ahorro de agua y eficiencia en la limpieza, es una boquilla con pared cónica y con orificio rectangular para la salida del agua. El orificio es de 6 mm de ancho y 1,58 mm de largo, dando un área de orificio de  $9,48 \text{ mm}^2$ .

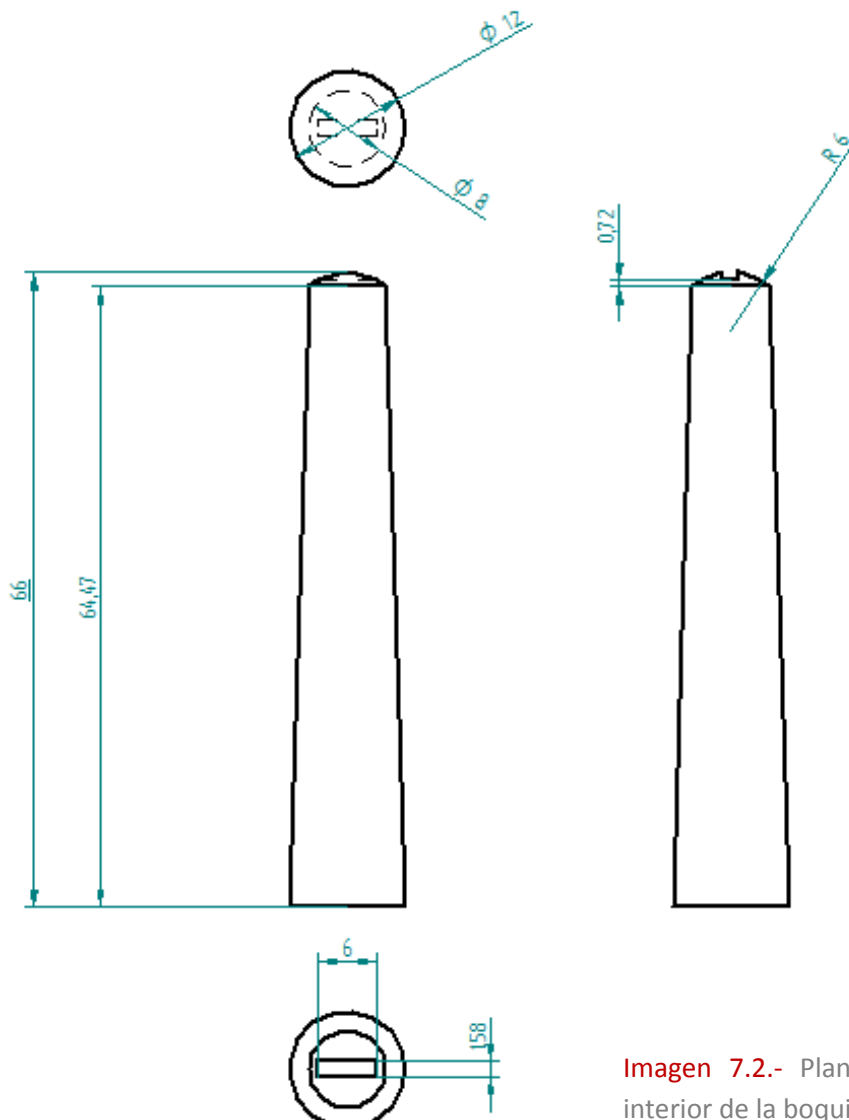


Imagen 7.2.- Planos de la zona interior de la boquilla propuesta



## 7.2. RESULTADO DEL GASTO MASICO DE AGUA. CALCULO DEL CAUDAL

El gasto másico del agua, proporcionado por el programa, entre las superficies de entrada y salida es:

Superficie	Gasto masico del fluido (kg/s)
Inlet	0,4227656
Outlet	0,4228027

La diferencia entre el valor de entrada y el de salida, que como adquiere el valor de  $3,7 \cdot 10^{-5}$  kg/s. En un problema estacionario este valor debe de ser cero, que al no haber fugas ni acumularse el fluido, el flujo que entra debe de ser el mismo que sale. Pero al valorar lo significativo de la diferencia, el error es de centésimas de gramo, lo que ayuda a valorar la fiabilidad del resultado obtenido. Para obtener un dato concreto, se asumirá como valor correcto la media de los dos, lo que dotará de más precisión el resultado final:

$$\overline{\dot{m}} = \frac{0,42276557 + 0,4228027}{2} = 0,42278 \text{ kg/s}$$

Para conocer el caudal no hay nada más que realizar un cálculo simple que sale de realizar un cambio de unidades. Partiendo del gasto másico que calcula el programa:

$$\dot{m} \left( \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right) = \rho \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \cdot Q(\text{m}^3/\text{s})$$
$$Q(\text{m}^3/\text{s}) = \frac{\dot{m} \left( \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right)}{\rho \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)} = \frac{0,42278 \text{ kg/s}}{1000 \text{ kg/m}^3} \cdot \frac{1000 \text{ dm}^3}{1 \text{ m}^3} = 0,42278 \frac{\text{dm}^3}{\text{s}}$$

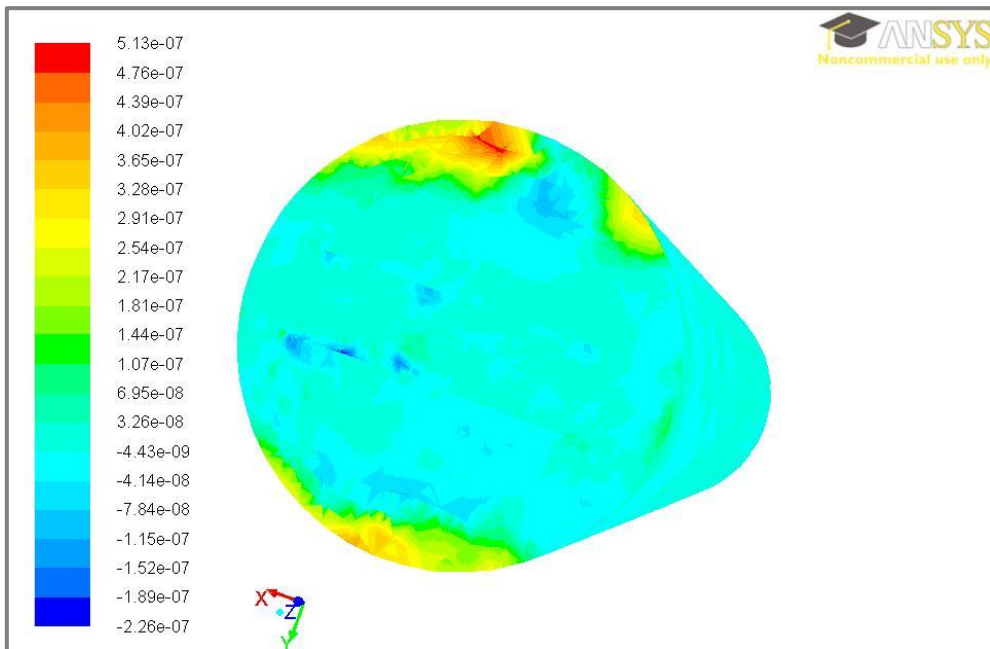
Ahora bien, es más natural en el entorno industrial, cuando se habla de volumen de agua, pasar los metros cúbicos a litros, sabiendo que un decímetro cubico de equivale a un litro.

$$Q(\text{dm}^3/\text{s}) = Q(\text{l/s}) \cdot \frac{1 \text{ dm}^3}{1 \text{ l}} = 0,42278 \frac{\text{l}}{\text{s}}$$

Pasando a una unidad más grande el tiempo:

$$Q(l/s) = 0,42278 \frac{l}{s} \cdot \frac{60 s}{1 min} = 25,3668 \frac{l}{s}$$

Por último, mencionar que para la valoración de cálculo del gasto másico, el programa facilita los balances de masa en las celdas, y se puede observar que en que zonas se produce este error, imagen 7.3. Para este caso, los errores máximos se dan en la zona roja-amarilla y azul oscura, ambos cercanos a la salida. Esto se debe a los propios fenómenos físicos que ocurren en esta zona, mayoritariamente por la aceleración por la contracción que sufre el fluido para salir por el orificio de salida.



**Imagen 7.3.-** Contornos de variación del flujo másico en el balance de masa

### 7.3. VELOCIDAD DE SALIDA

Aparte del consumo el otro parámetro de gran importancia es la velocidad. El programa calcula como valor máximo de la velocidad en 59,7 m/s. En la siguiente imagen se muestra los valores proporciona el programa:

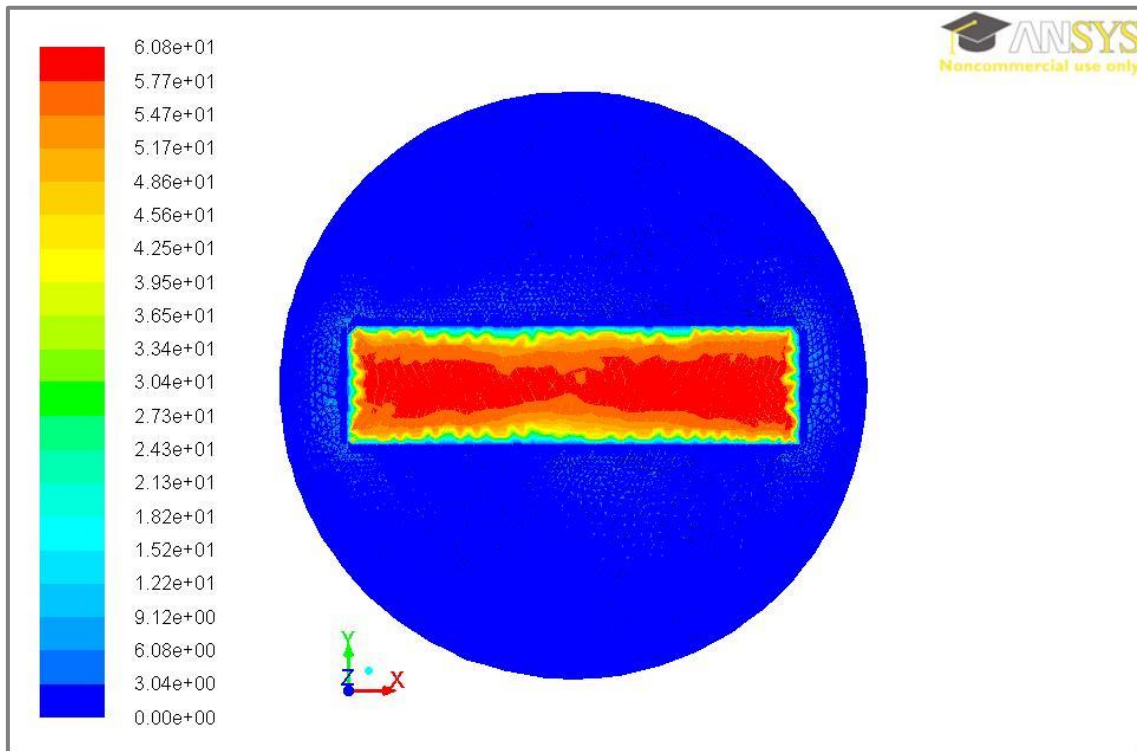
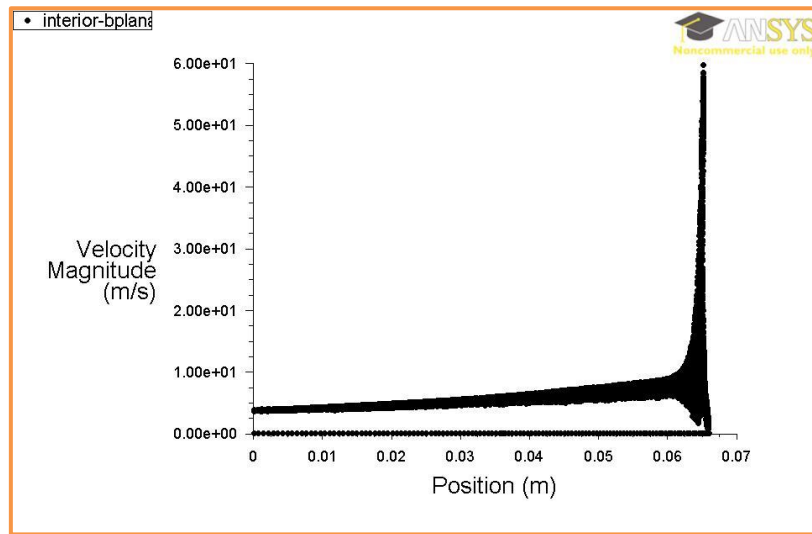


Imagen 7.4.- Contornos de velocidad vistos desde la vista de alzado

Se observa que el valor máximo se da en la mayor parte del orificio de salida. Así pues se asumirá como valor de la velocidad en la salida de 60,8 m/s. Pasando estos datos a unidades más habituales, kilómetros por hora:

$$v(km/h) = 60,8 \text{ m/s} \cdot \frac{1 \text{ km}}{1000 \text{ m}} \cdot \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ hora}} = 218,88 \text{ km/h}$$

Se puede apreciar que la velocidad aumenta con respecto al obtenido con la boquilla actual. En la siguiente gráfica se puede observar como varía la velocidad a largo del eje de la boquilla.



**Imagen 7.5.-** Incremento de la velocidad a lo largo del eje de simetría

Cada sección a una distancia (eje X), tiene puntos de cada valor de velocidad de las celdas de esa sección. En la gráfica lo más llamativo a valorar es como se transforma en apenas unos milímetros, un gran valor de energía potencial en energía cinética, acelerando el fluido y aumentando la velocidad. También se puede ver que hay valores de velocidad cero, correspondientes al fluido en contacto con la pared

Valorando el resultado final, al haber establecido el error de la velocidad en los tres ejes como criterio menor de  $10^{-4}$ , frente a la magnitud del resultado de 60,8 m/s, se puede asumir despreciable el error en el cálculo de velocidad y deducir que el resultado de la velocidad es de gran precisión.

## 7.4. OTROS PARAMETROS

### 7.4.1. TURBULENCIA

La turbulencia que existe se concentra en la salida. El programa es capaz de representar el valor máximo de turbulencia y ver en las celdas en las que se produce. Como es de prever ocurre en el momento que el flujo más se acelera para pasar por el orificio de salida. El valor de la turbulencia es tiene 5 órdenes de magnitud por encima del error hallado, ya que el error es menor de  $10^{-3}$ , por tanto es una buena elección el modelo K-épsilon, que tiene mejor precisión, aunque los otros modelos también eran válidos.

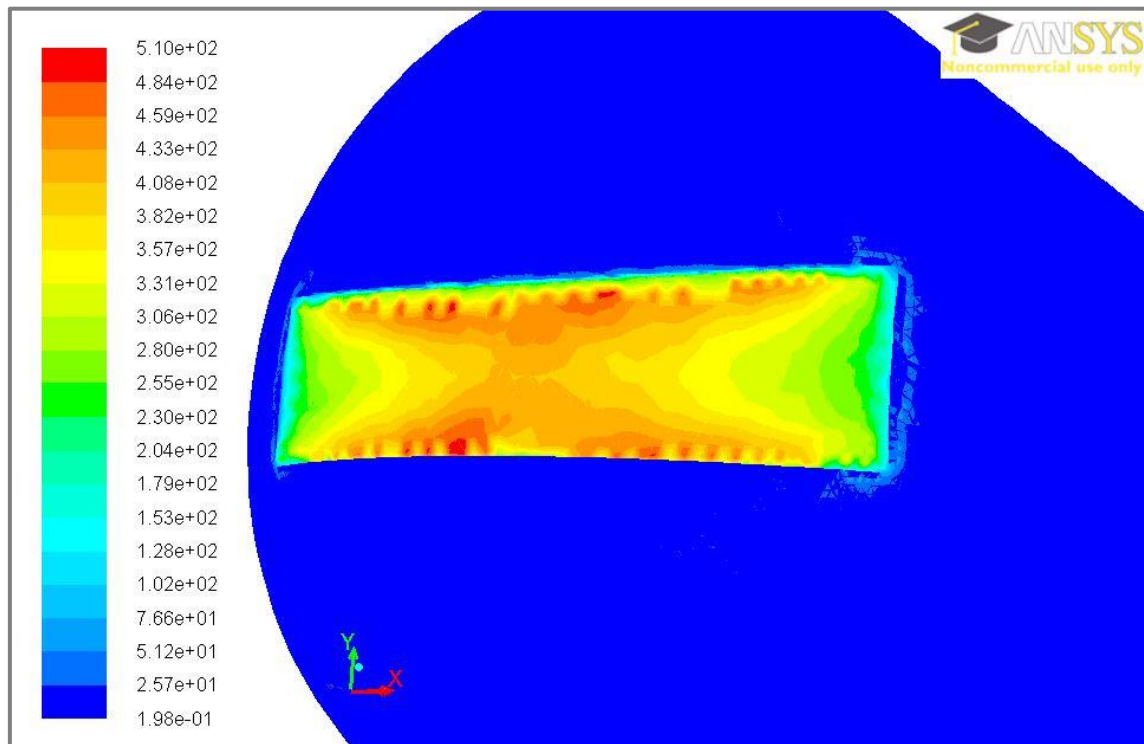


Imagen 7.6.- Contornos de turbulencia

### 7.4.2. PRESION EN EL INTERIOR

La presión interna es útil para conocer donde se crea la mayor pérdida de carga. Al ser una pared lisa no hay pérdidas significativas a lo largo del interior. El cambio de presión se produce en

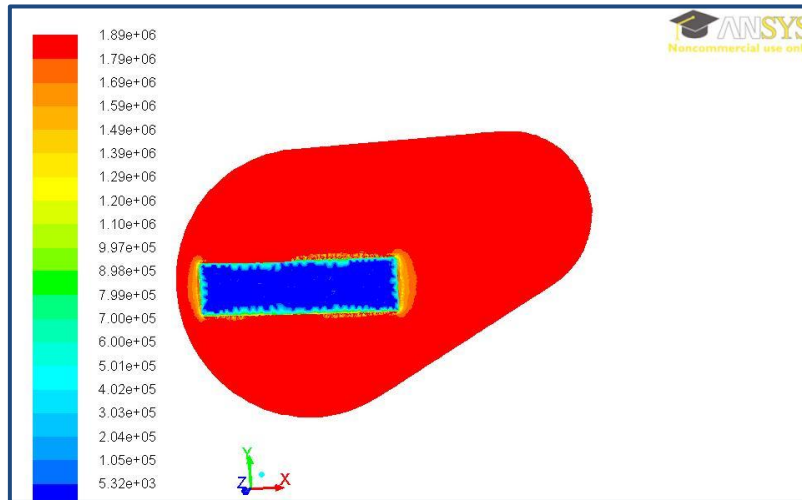


Imagen 7.7.- Contornos de presión

La presión interna mayor que sufre es de 1,9 MPa. Con este dato otra valoración que se puede hacer, es conocer cuál es el valor que genera la presión del agua en la pared, interesante para el estudio de resistencia mecánica que determinará la vida de la boquilla. Se puede comprobar al comparar la presión estática que soporta el material con el límite a fatiga para suponer vida infinita (no se romperá por fatiga el material).

Del siguiente formulario para el calculo de fatiga se obtiene el límite a fatiga (Fuente: Formulario asignatura Calculo y Diseño de Maquinas del Grado de Mecánica, Universidad Carlos III):


	
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA	
<b>2. <u>FATIGA</u></b>	
! <u>LÍMITE DE FATIGA SIN CORREGIR PARA VIDA INFINITA (S'e)</u>	
Cuando no se dispongan de datos experimentales para el cálculo del límite de fatiga se puede utilizar el siguiente criterio:	
<u>Hierros y aceros forjados.</u>	<u>Aceros colados.</u>
$S_e' = 0.5 S_{ut} \Rightarrow S_{ut} \leq 1400 \text{ MPa}$	$S_e' = 0.45 S_{ut} \Rightarrow S_{ut} \leq 600 \text{ MPa}$
$S_e' = 700 \text{ MPa} \Rightarrow S_{ut} \geq 1400 \text{ MPa}$	$S_e' = 275 \text{ MPa} \Rightarrow S_{ut} \geq 600 \text{ MPa}$

Imagen 7.9.- Contornos de variación del flujo másico en el balance de masa

Hace falta el dato del límite elástico y límite de rotura del acero AISI-316, que son 190-210 MPa y 460-860 MPa. (Fuente: [http://www.thyssenkrupp.cl/archivos/AISI\\_316.pdf](http://www.thyssenkrupp.cl/archivos/AISI_316.pdf))

Conociendo que para la elaboración de la boquilla se parte de vigas circulares de acero, generadas por colado, del formulario se deduce que el límite es de 0,45 veces la resistencia última a tracción.

Por tanto en el peor de los casos, que la resistencia última sea de 460 MPa, el límite a fatiga esta en:

$$Se' = 460 \cdot 0,45 = 206 \text{ MPa} \ll 1,9 \text{ MPa}$$

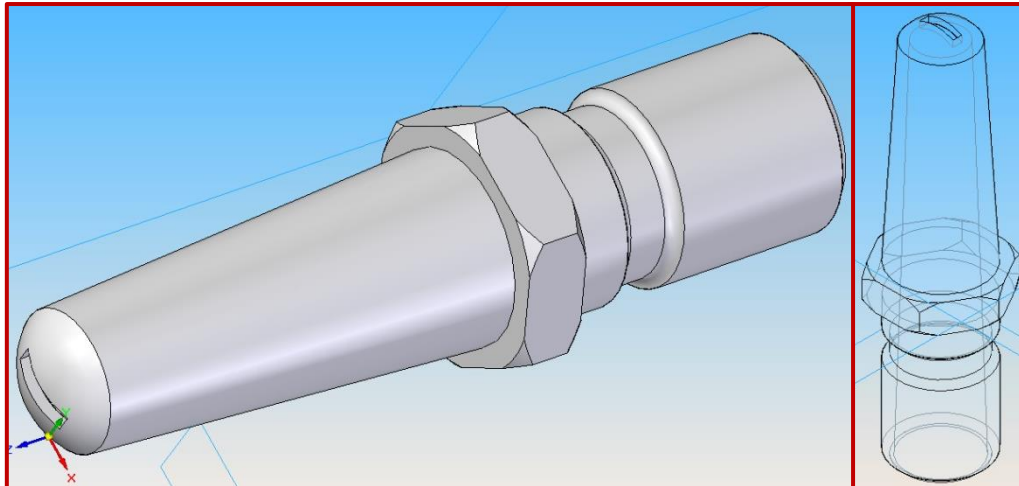
Por tanto, aunque el límite a fatiga es sin corregir, la presión que sufre es pequeña y no hace falta corregir el factor para conocer que la boquilla tiene vida infinita respecto a fatiga.

Pero si es cierto que intervienen otros parámetros por el cual la boquilla se deteriora. Los golpes y la erosión del agua son las dos principales causas del deterioro de una boquilla. El factor más crítico es la fatiga superficial que soporta. Según el propio encargado de Telide, las boquillas suelen empezar a perder efectividad a partir del primer mes, y se suelen cambiar a los dos o tres meses, por las dos causas comentadas antes.



## 7.5. DISEÑO DE LA PARTE EXTERNA DE LA BOQUILLA. PLANOS

La parte externa es la resultante de la inversa de la parte interna, es decir la parte interna corresponde ahora el hueco de la boquilla interna. El proceso de su modelado esta descrito en el Anexo III.



**Imagen 7.10.-** Imagen del modelo de boquilla propuesta. En la imagen de la derecha se puede ver la boquilla transparente, donde se puede apreciar como el diseño interno corresponde con la zona fluida simulada

La boquilla por fuera está diseñada de tres partes, en el mismo acero AISI301 que su predecesora. Los parámetros que caracterizan el diseño son:

- Consta del método de unión por norma en mangueras que permite el acople y desacople con facilidad, asegurando la estanqueidad. El diámetro exterior es de 25 mm e interior de 12 mm.
- A continuación tiene una zona parecida a una tuerca, pensada para asirla mediante su mecanización. Otro buen motivo es facilitar su extracción en caso de golpe o que no funcione el acople correctamente. Además esta parte tiene las aristas redondeadas para evitar posibles cortes en su manipulación.
- El resto de la pared recubre el cono, con un espesor mínimo de 2 mm con el fin de asegurar la integridad de la misma, y reducir peso y coste.
- El orificio rectangular tiene las dimensiones elegidas en los apartados anteriores, de 6 mm x 1,58 mm, proporcionando un área de salida de  $9,58 \text{ mm}^2$ .
- En la cara del plano del orificio esta redondeada, para minimizar la caída de presión y las turbulencias.

A continuación se muestran los planos, que son:

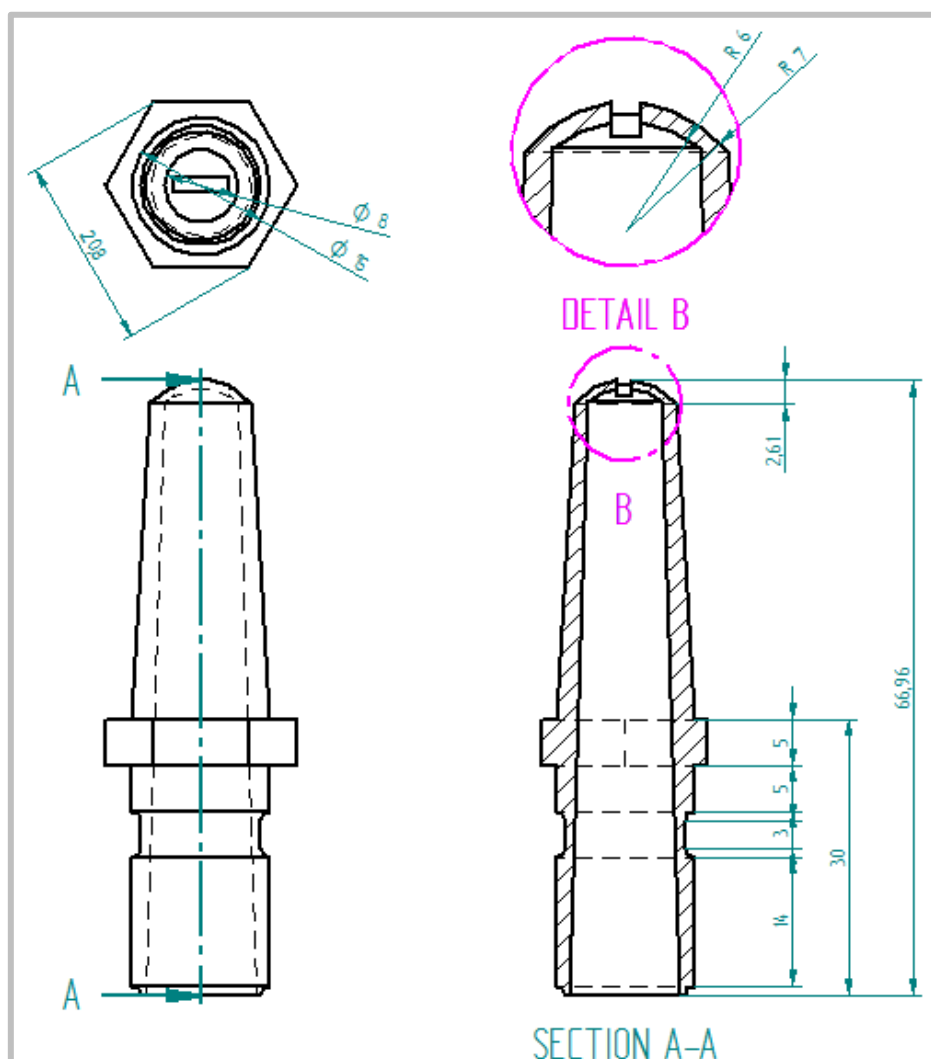


Imagen 7.11.- Diseño de la boquilla

## 8. CONCLUSIONES DEL PROYECTO

---

### 8.1. CONSIDERACIONES DEL PROYECTO

El objeto primordial de este estudio la disminución del consumo de agua proponiendo un nuevo modelo de boquilla. Una vez propuesto un diseño de boquilla, para valorar los resultados habrá que comparar ambos resultados de los parámetros. Para ello habrá que comparar los dos valores de caudal y velocidad. Además se debe de valorar los demás parámetros que caracterizan por completo a la boquilla, y hacer una previsión del ahorro que se podría conseguir para conocer si es factible invertir en el nuevo diseño.

### 8.2. COMPARACION DEL CONSUMO DE AGUA

De la boquilla que se usa actualmente se conoce un gasto en la práctica de 35 l/min (dato obtenido de un informe, dato medido con un caudalímetro). Pero este difiere, aunque muy poco con el obtenido en la simulación. Como el dato del consumo de la boquilla propuesta es obtenido por simulación, la comparación se realizara con los datos de las simulaciones. El pequeño error que se pudiera cometer ocurrirá en los dos casos, y la comparación será más certera.

Así pues el dato del consumo de la boquilla actual mediante simulación es:

$$Q_{actual} \left( \frac{l}{min} \right) = \dot{m} \left( \frac{kg}{s} \right) \cdot 60 \left( \frac{s}{min} \right) = 0,591478 \cdot 60 = 35,48871 \text{ l/min} \approx 35,49 \text{ l/min}$$

Por otro lado, del modelo propuesto hemos obtenido un caudal:

$$Q_{propuesta} \left( \frac{l}{min} \right) = \dot{m} \left( \frac{kg}{s} \right) \cdot 60 \left( \frac{s}{min} \right) = 0,422784 \cdot 60 = 25,36704 \text{ l/min} \approx 25,37 \text{ l/min}$$

Calculando la variación del caudal, para averiguar el ahorro:

$$\Delta Q = Q_{actual} - Q_{propuesta} = 35,48871 - 25,36704 = 10,12167 \text{ l/min} \approx 10,12 \text{ l/min}$$

Para hacerse una mejor idea del ahorro, cuantificando esta variación en tanto por ciento:

$$\Delta Q(\%) = \frac{35,49 - 25,37}{35,49} \cdot 100 = 28,51\%$$

El ahorro que se consigue es del 28,51%, más de un cuarto del total de ahorro con respecto a la actual.

### 8.3. COMPARACION DE LA VELOCIDAD

El objetivo que se pretende con la velocidad es intentar mantener constante la velocidad, para intentar no perder la potencia de limpieza. Comparando la velocidad que proporciona las simulaciones:

- La velocidad en la boquilla actual era de 55,9 m/s, que son 201 km/h.
- La velocidad de la boquilla propuesta es de 60,8 m/s, que son 218 km/h.

Se observa que la velocidad no solo no disminuye, si no que aumenta ligeramente. Así pues, comparando en porcentaje el dato de la velocidad:

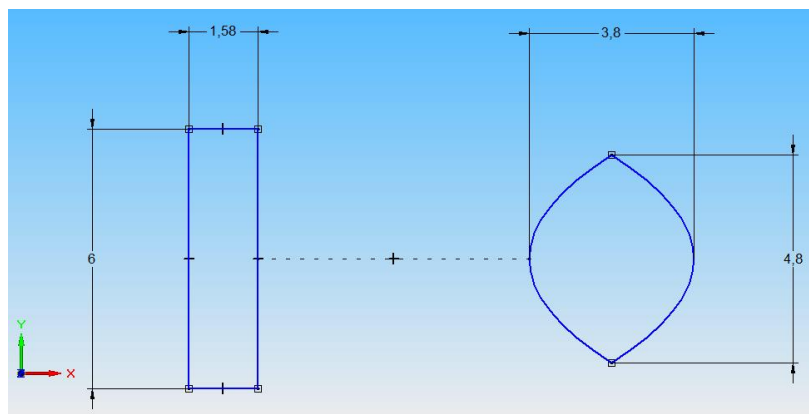
$$\Delta v(\%) = \frac{218 - 201}{218} \cdot 100 = 7,79\%$$

La velocidad se incrementa en un 7,8% con respecto al valor del resultado actual.

### 8.4. COMPARACION DE OTRAS CARACTERISTICAS

#### AREA DEL ORIFICIO

La dimensión de los orificios es la siguiente, la rectangular corresponde al modelo propuesto:

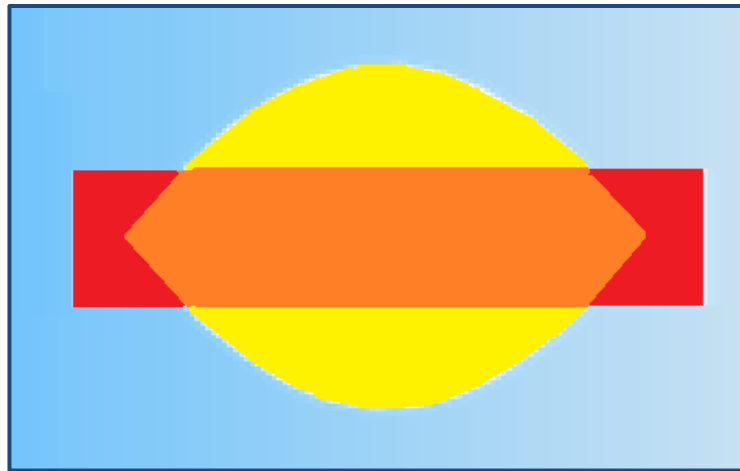


**Imagen 8.1.-** Comparación de las áreas de la boquilla propuesta a la izquierda y actual a la derecha

$$A_{propuesta\ rectangular} = 6 \cdot 1,58 = 9,48\ mm^2$$

$$A_{actual\ elipsoidal} = \frac{2}{3} \cdot 4,8 \cdot 3,8 = 12,16\ mm^2$$

En la siguiente imagen se puede observar las dos áreas correspondientes al orificio de salida de la boquilla acutal (amarillo) y el orificio de la boquilla propuesta (grana).



**Imagen 8.2.-** Superposición de ambas áreas. Se puede ver que la diferencia mayoritariamente es en el ancho. Sin embargo aunque el área total es menor en la boquilla propuesta, el largo es mayor

El área es inferior en el caso de la boquilla propuesta, pero se compensa con parámetros como la efectividad de limpieza en los bordes, y debido al método de uso de la manguera, haciendo pasadas arrastrando la suciedad, el área se compensa con el aumento de velocidad. Aunque bien es cierto que no se puede concretar cual será mejor, se presupone no debe de haber diferencia significativa por reducción del área.

### AREA PROYECTADA

Como se vio en un apartado anterior, las imágenes de una elipse frente al de un rectángulo:



**Imagen 8.3.-** Comparación de las diferentes áreas. La rectangular presenta una distribución más uniforme, lo que mejoraría la potencia de limpieza

El área proyectada es más aprovechable en el caso del círculo y rectángulo. Por tanto, se espera que la mejora significativa en la potencia de limpieza, se compense con la disminución del área.

### *MECANICA DE LIMPIEZA*

Un parámetro no cuantificable, del cual ya se ha hablado, está en la propia forma de proyección del agua. Basado en la opinión de expertos de la limpieza, se expresa que para limpieza a presión, presenta un mejor comportamiento la boquilla de orificio rectangular, también denominado de pato. Realizar pasadas de manera vertical u horizontal facilita la retirada de los residuos en la pared o en el suelo, cosa que se complica cuando el chorro se dispone de forma circular o elipsoidal. Ver apartado del punto 9. Esto provocará una reducción notable en el tiempo de uso de manguera.

### *PARED DE LA BOQUILLA*

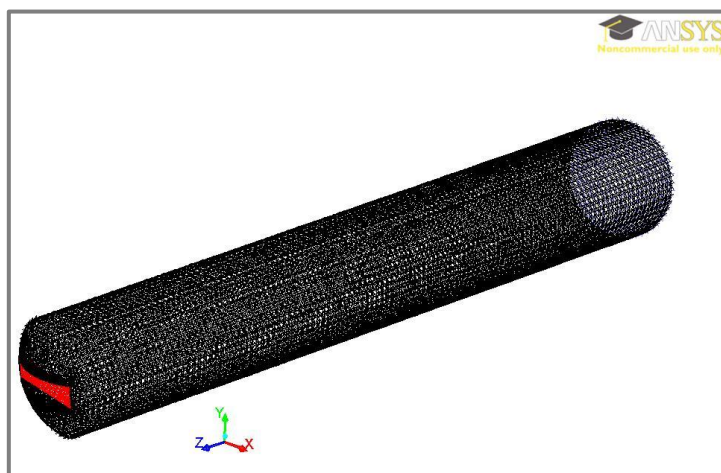
El modelo propuesto usa una pared cónica. Como se ha visto en las graficas del apartado 6.2. y se ha comentado, se podría valorar la idea de mantener fijo el diseño del orificio de salida propuesto y realizar la boquilla con tres contracciones bruscas como el modelo actual, ya que es mas fácil su mecanizado en torno. Esto dependerá de la valoración del fabricante que las lleve a cabo y del método de fabricación empleado.

El modelo propuesto es el más óptimo, ya que el modelo con tres contracciones bruscas en la pared tiene mayor pérdida de carga, reduciendo la velocidad a 59 m/s y aumentando ligeramente el caudal a 26,2 l/min, tras la simulación del caso.

## **8.5. CRITERIO DE CONVERGENCIA Y ERRORES**

### *RESOLUCION DE LA MALLA*

La malla, consta del valor máximo optimizado, siguiendo el proceso descrito en el apartado 5.3. La malla es la siguiente:



**Imagen 8.4.-** Malla usada para la simulación del interior de la boquilla, antes del refinamiento de la misma

La malla consta de las siguientes características:

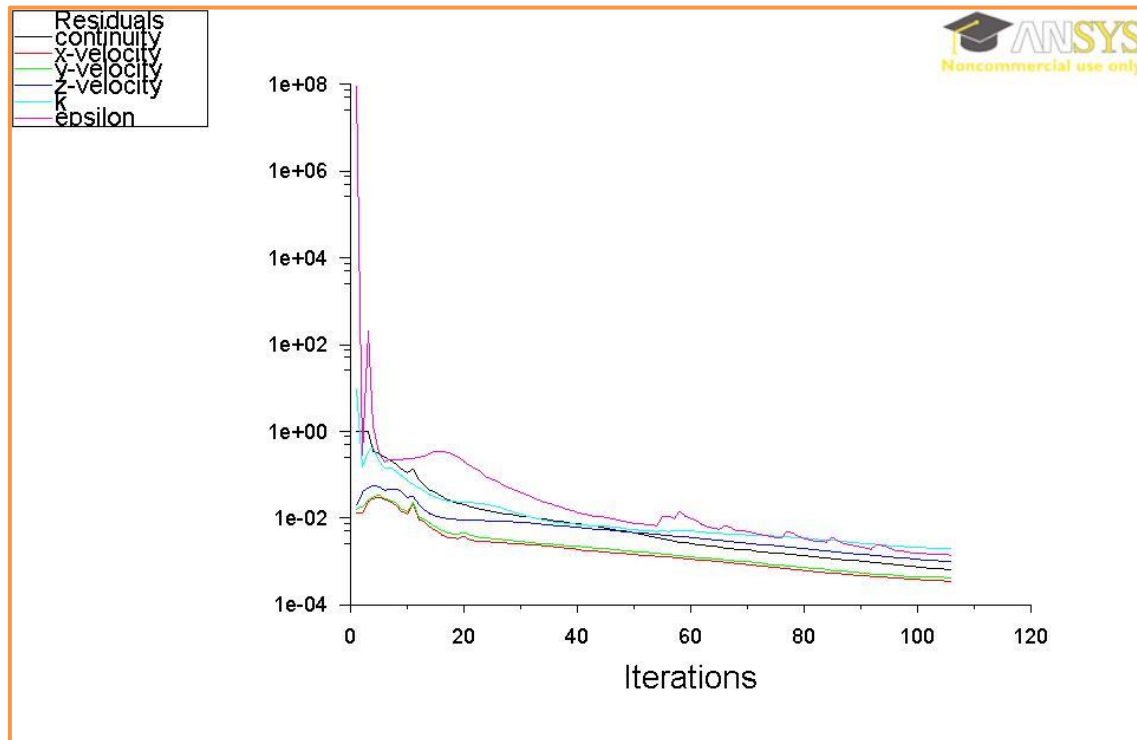
<i>Resolución de la malla</i>	
<i>Celdas</i>	<i>193.706</i>
<i>Nº total de caras en las celdas</i>	<i>454.022</i>
<i>Nodos</i>	<i>65.523</i>

**Tabla 8.1.-** Resolución de la malla usada para el modelo propuesto, tras refinar la malla como se ha explicado en el punto 5.3.

La resolución no puede ser mayor debido a la restricción de la versión de Fluent académica de 512.000 elementos. Aun así la resolución es alta, ya que sin refinar la malla el resultado es similar (detallado en el apartado 5.3.)

### CRITERIO DE CONVERGENCIA

El criterio de convergencia estipulado es en las ecuaciones de continuidad y velocidad, un error máximo de  $10^{-4}$ , mientras que en modelo de turbulencia es de  $10^{-3}$ . El proceso de iteración del problema se muestra en la figura siguiente, resolviéndose bajo los criterios expuestos en la iteración 105.



**Grafica 8.1.-** Esta gráfica muestra los errores en función de las iteraciones del cálculo de la solución del problema. El problema converge en la iteración 105, debido al criterio de errores impuesto.



## ERRORES

Los errores, debido a los criterios de convergencia en ambos casos el orden de magnitud es muy pequeño frente a los valores que representan, por lo que la precisión de la solución es alta.

Ecuación	Valor	Error asociado
Continuidad (kg/s)	0,422784	6.5591e-04
Velocidad eje X (m/s)		3.5446e-04
Velocidad eje X (m/s)	60,8	4.2512e-04
Velocidad eje X (m/s)		9.9909e-04
Ecuación turbulencia K (-)	510	2.0005e-03
Ecuación turbulencia $\epsilon$ (-)		1.4337e-03

**Tabla 8.2.-** Errores de la simulación del modelo propuesto. El alto criterio de convergencia dota de gran precisión a los resultados arrojados por el programa.

## 8.6. BENEFICIOS DEL USO DEL MODELO PROPUESTO

### 8.6.1. AHORRO POR DISMINUCION DEL CAUDAL

Para cuantificar el ahorro de gasto solo debido a la disminución de caudal, suponiendo el tiempo y potencia de limpieza igual que en la boquilla actual, sabiendo que el volumen de agua mensual, demostrado en el apartado anterior es:

El tiempo de uso de limpieza era de 2280 horas/mes, lo que resultaba en 4788 m<sup>3</sup>/mes en agua, por tanto, suponiendo constante el tiempo:

$$\bar{X}_{\text{volumen de agua actual}} = 4788 \text{ m}^3/\text{mes}$$

$$\bar{X}_{\text{volumen de agua propuesto}} = t_{\text{manguera}} \cdot Q_{\text{propuesto}}$$

$$\bar{X}_{\text{volumen propuesto}} = 2280 \text{ horas/mes} \cdot 60 \text{ min/hora} \cdot 25 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{min} = 3240 \text{ m}^3/\text{mes}$$

### 8.6.2. DISMINUCION DEL TIEMPO DE ACLARADO

Por otro lado está la reducción del tiempo que se presupone del modelo propuesto. Con el aumento de la velocidad y las nuevas características del chorro que proporciona la boquilla, se producirá una reducción de tiempo. Esto junto con la concienciación a los empleados, pretende una reducción de los tiempos en el uso de manguera. Hablando con el encargado de limpieza se prevé que la reducción de tiempo oscile sobre el 5%.

Pero como es imposible cuantificar, como ejemplo expondremos el ahorro que se produciría reduciendo el 5% del tiempo de limpieza. (Como es un ejemplo para cuantificar el ahorro que se podría conseguir, calcularemos la disminución de tiempo sobre las horas, aunque esto provocaría que el volumen de agua usado fuera menor, ya que el tiempo sería menor también).

El tiempo de uso de manguera es de 91,2 horas/día, con la boquilla actual, así que si se reduce este tiempo un 5%:

$$91,2 \text{ horas/día} - \left( 91,2 \text{ horas/día} \cdot \frac{5}{100} \right) = 86,64 \text{ horas/día}$$

### 8.6.3. CALCULO DEL COSTE DEL USO DE LA BOQUILLA PROPUESTA

Analizando los costes que aborda el objeto de estudio de este trabajo relativos a la limpieza con el uso de manguera de aclarado de agua caliente:

- Por un lado están los costes del agua caliente, que son 5,54 €/m<sup>3</sup> (incluyendo los costes de calentar y osmotizar el agua).

Teniendo en cuenta que se consume de media 3240 m<sup>3</sup>/mes:

$$3240 \text{ m}^3/\text{mes} \cdot 5,54 \text{ €/m}^3 = 17.949,60 \text{ €/mes}$$

- Conociendo que las horas de uso de la manguera son 86,64  $\frac{\text{horas}}{\text{día}}$ , y que el precio por contrato es de 12,46  $\frac{\text{€}}{\text{hora}}$ :

$$86,64 \text{ horas/día} \cdot 12,46 \text{ €/hora} \cdot 25 \text{ días/mes} = 26.988,36 \text{ €/mes}$$

Aproximadamente al mes en Secalsa se gasta en concepto de uso de manguera por la limpieza:

$$C_{\text{total limpieza mes}} = 17.949,60 \frac{\text{€}}{\text{mes}} + 26.988,36 \frac{\text{€}}{\text{mes}} = 44.937,96 \frac{\text{€}}{\text{mes}}$$

$$C_{\text{total limpieza año}} (12 \text{ meses}) \approx 539.255,52 \text{ €/año}$$

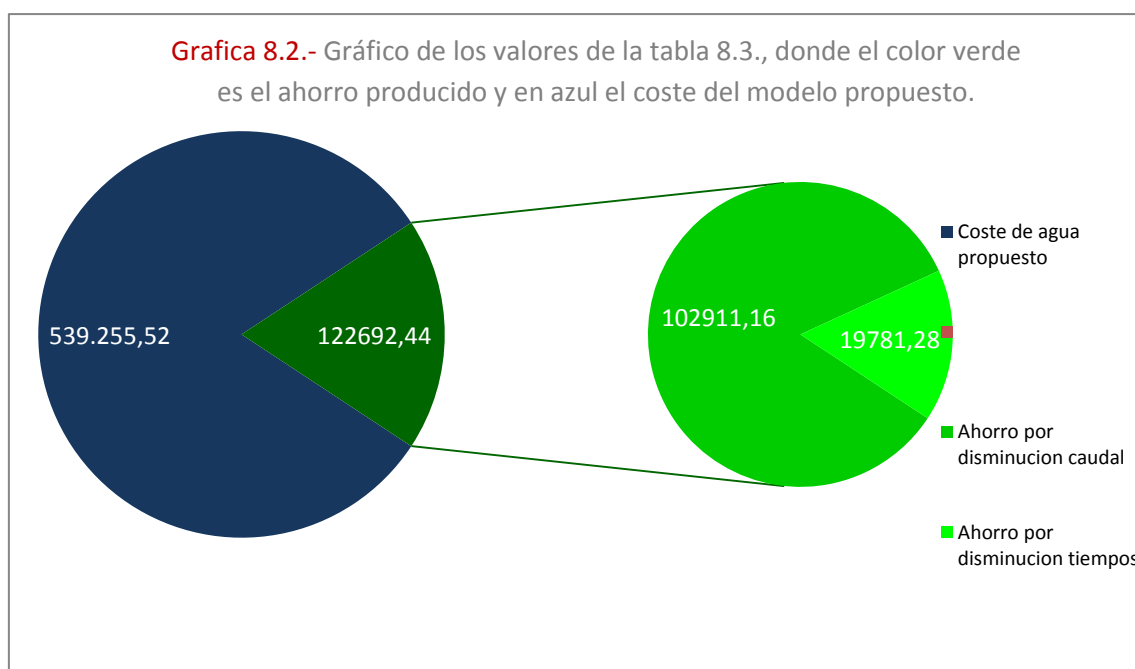
#### 8.6.4. BENEFICIO TEORICO DE LA NUEVA IMPLANTACION

El ahorro conseguido se obtiene directamente de restar el coste total en ambos casos. En la siguiente tabla se puede ver el ahorro de forma detallada:

	Coste de agua manguera anual	Coste de tiempo manguera anual	Coste total anual
Actual	318.306,36	343.641,60	661.947,96
Propuesto	215.395,20	323.860,32	539.255,52
Ahorro	102.911,16	19.781,28	122.692,44
% Ahorro	32,33	5,76	18,54

Tabla 8.3.- Costes y ahorros derivados de la implantación del modelo propuesto.

Con el fin de valorar mejor estos valores, el siguiente gráfico muestra los valores:



El primer círculo entero es el coste total actual, y en verde el ahorro que se produciría. El círculo verde, a su vez, se divide en el círculo de la izquierda. En el donde muestra el ahorro por la disminución de consumo y el caudal.

En definitiva, con el este estudio queda demostrado la viabilidad de invertir en la creación de una nueva boquilla, cuyos valores rondan menos de 10 euros, ya que probablemente se esté hablando de un ahorro de más de 122.000 €/año en esa planta. Y no solo es el ahorro que se produciría en esa planta, sino que se debería de extrapolar el modelo a las demás fábricas, consiguiendo un ahorro muy significativo.

## 8.6. BENEFICIOS DEL USO DEL MODELO PROPUESTO

Otras conclusiones interesantes que se sacan de este estudio, y que sería interesante su estudio son:

- Plantear el uso de dos tipos de boquillas para el aclarado.
- Estudio de las otras dos boquillas que intervienen en la operación de higiene y desinfección, a saber: mojado con agua fría y espumado.
- Un estudio de nuevas mangueras, ya que la pérdida de carga es importante en ella.
- Concienciación a los trabajadores, y formación.
- En las nuevas tendencias de investigación, se está invirtiendo en aplicar aire al agua para la limpieza.

# BIBLIOGRAFÍA

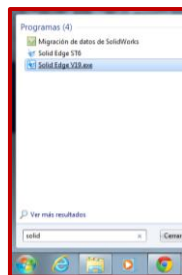
---

- *Robert D. Blevins, Applied Fluid Dynamics Handbook, 1992, Krieger Publish Company*
- *Datos empresariales de Grupo Incarlopsa: [www.incarlopsa.es](http://www.incarlopsa.es)*
- *Proceso de elaboración del jamón de: [www.navidul.es](http://www.navidul.es)*
- *<http://www.telide.es>*
- *Departamento de mantenimiento de Secalsa e Incarlopsa*
- *Encargado departamento técnico de Telide, Francisco Varadi*
- *Informe consumo de agua marzo de 2013 de Telide S.L.*
- *Factura Empresa proveedora de la boquilla actual Sealed Air*
- *Catálogo de productos Agrícola Tarancón*
- *Diagrama t-s del curso abierto de termodinámica del MIT*
- *M.J. Morán y H.N. Shapiro, Fundamentos de la termodinámica técnica, 2004, Editorial Reverté*
- *Apuntes y Formulario de la asignatura Mecanica de Fluidos de la Universidad Carlos III*
- *Apuntes de la asignatura Ingenieria Hidraulica Universidad Carlos III*
- *Apuntes de la asignatura Transferencia de calor de la Universidad Carlos III*
- *Tablas de rugosidad y prontuario de propiedades del agua de Milliarium, empresa que ofrece cursos de ingeniería civil y medio ambiente*
- *Russel C. Hibberler, Mecánica vectorial para ingenieros, 2004, Mc Graw Hill*
- *Catalogo de la empresa Pentair 'PNR'*
- *CTE, Codigo tecnico de edificacion*
- *BOE, Boletin oficial del estado para las normas aplicables a la industria alimentaria, citadas en normativa*
- *Apuntes de la asignatura Simulacion Numerica de Flujo Industriales de la Universidad Carlos III)*

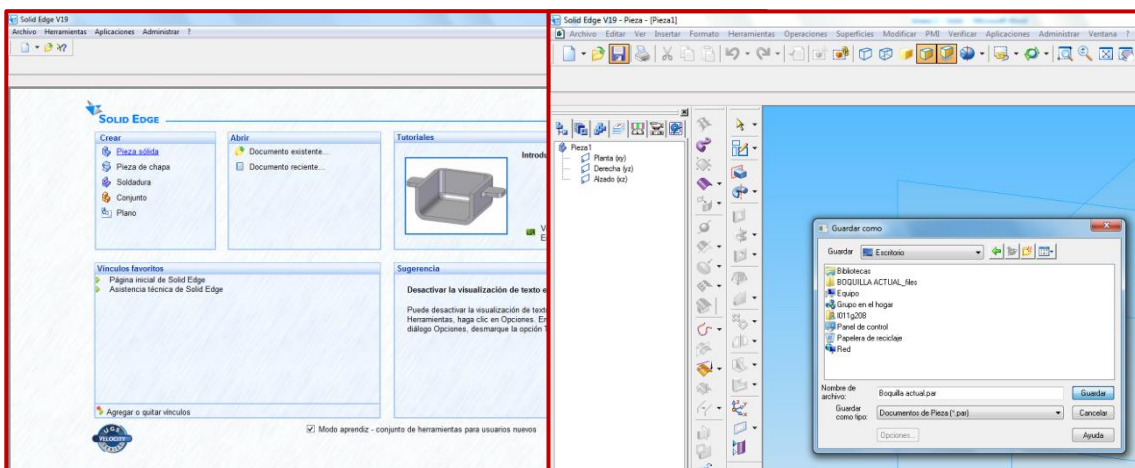
- *Jesús Meneses y Carolina Álvarez, Introducción al Solid Edge, 2006, Editorial Paraninfo.*
- *Apuntes de la asignatura Diseño Industrial de Grado en Ingeniería Mecánica.*
- *Manual de ayuda de Ansys Workbench.*
- *Fuente de teoría de simulación y modelos de turbulencia: <http://www.cfd-online.com/>*
- *Brian Launder y Dudley Spalding. Lectures in Mathematical Models of Turbulence, 1979, Academic Press.*
- *Wikipedia*
- *Apuntes y formulario asignatura Calculo y Diseño de Maquinas del Grado de Mecánica, Universidad Carlos III):*
- *Propiedades del acero obtenidas de: [www.thyssenkrupp.cl/archivos/AISI\\_316.pdf](http://www.thyssenkrupp.cl/archivos/AISI_316.pdf)*

# ANEXO I: MODELADO 3D DEL INTERIOR DE UNA BQUILLA

El siguiente manual explica como realizar el diseño del interior de una boquilla por ordenador. Teniendo en cuenta que se va a trabajar con el programa de simulacion de flujo FLUENT, para modelar el fluido que circula por el interior de la misma, deberemos modelar el interior 3D con un programa compatible, en este caso sera el programa Solid Edge v19. Como se quiere modelar el fluido, en lugar de modelar la boquilla, se debe de modelar el interior, para que después el propio programa FLUENT lo reconozca como zona fluida. Conociendovel lo que queremos modelar, se debe abrir el programa, clicando en el icono de SOLID V19.exe



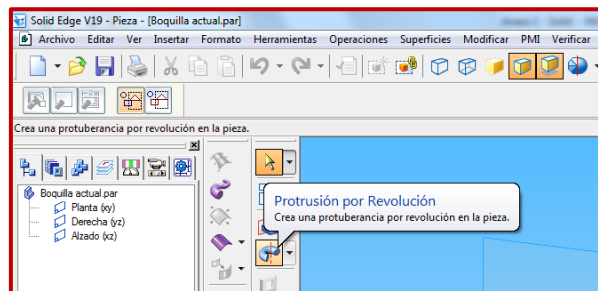
Una vez haya arrancado el programa, lo siguiente que aparece son las siguientes funciones que ofrece el programa. En este caso vamos a usar 'Pieza Solida'. Es aconsejable desactivar el ayudante de aprendiz, que puede llegar a ser molesto.



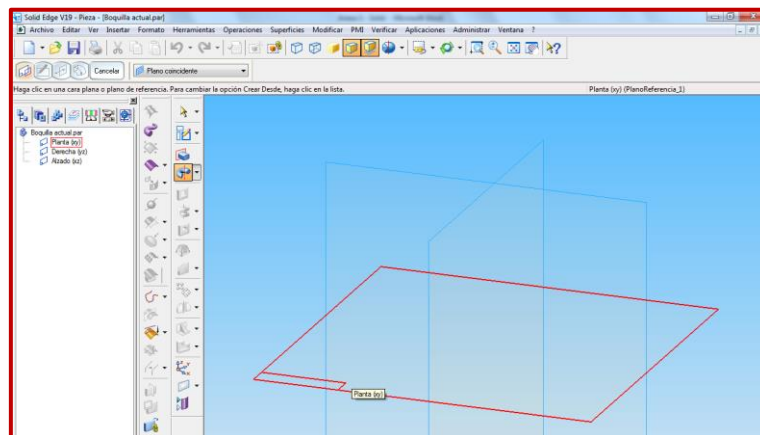
Se presenta asi el espacio de trabajo del programa, y lo primero es guardar el proyecto. El programa usa una gran cantidad de memoria física del ordenador y puede llegar a quedarse colgado. Guardamos el proyecto en el escritorio como Boquilla actual.par, extensión predeterminada, y que es obligatorio mantener para que despues FLUENT cargue el archivo.



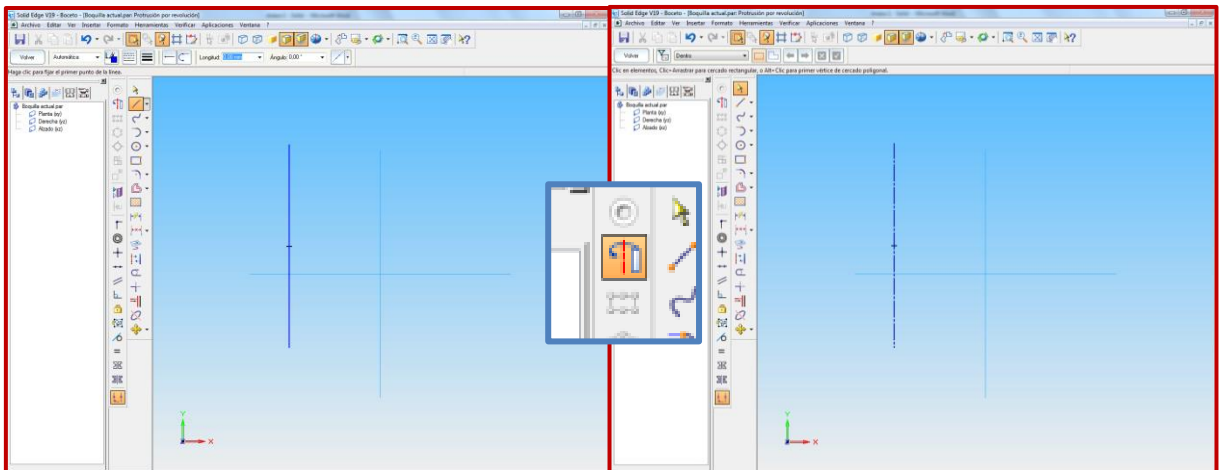
El programa está basado en operaciones booleanas (sumar y restar material), por lo que la creación de la misma debe plantearse de la misma manera. Esto está pensado de esta manera porque así es realmente como se fabrican las piezas con CNC o máquinas manuales. El primer paso será pues crear el cuerpo principal, sobre el que después se realizarán las modificaciones necesarias. Para ello hay que clicar el botón de la protuberancia por revolución, que es la manera más óptima de realizar cilindros como es nuestro caso. Hay que mencionar que para una misma pieza hay varios caminos, más largos y más cortos, para hacer la pieza de manera correcta.



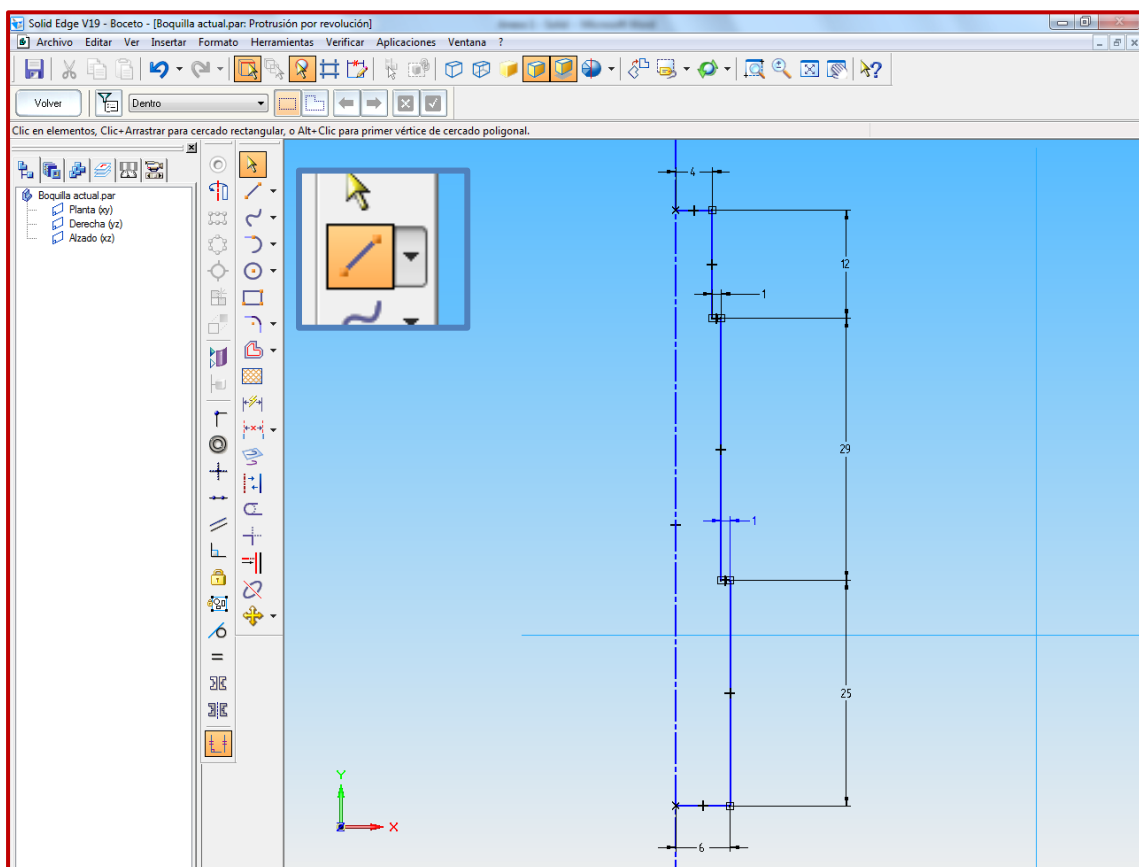
Arriba en la parte izquierda existe un cuadro de texto, llamado Intel Sketch, que comenta los pasos que debes dar en cada operación. Lo primero tras pulsar el botón es seleccionar sobre el plano que realizara el dibujo, da igual el plano que pinchemos, en este caso es el XY el seleccionado.



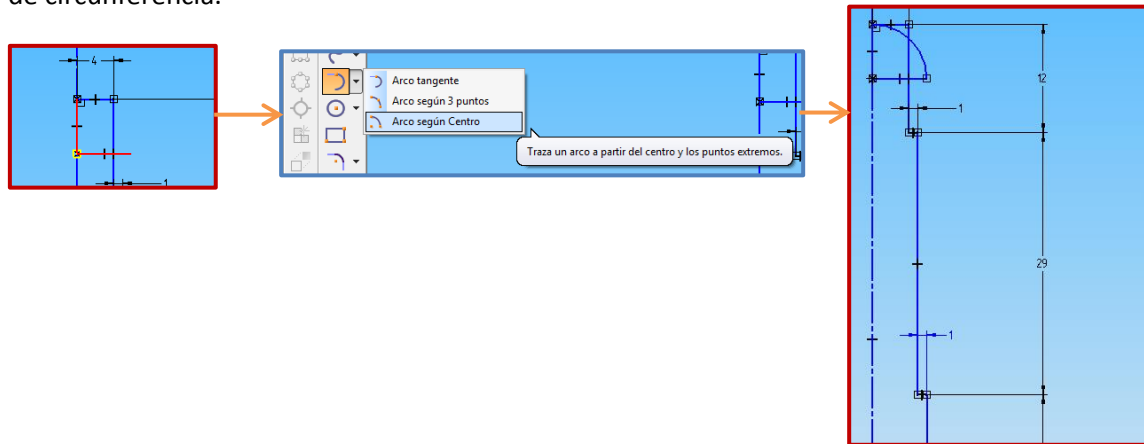
Tras clicar en plano el visor se coloca este plano seleccionado, las herramientas a las de dibujo cambian. Dibujamos una línea recta pulsando el comando de línea, la cual será el eje de revolución, y que por tanto no importará el tamaño de la misma. Lo siguiente es hacer clic en el botón de eje y seleccionar la línea, que acabará apareciendo como discontinua.



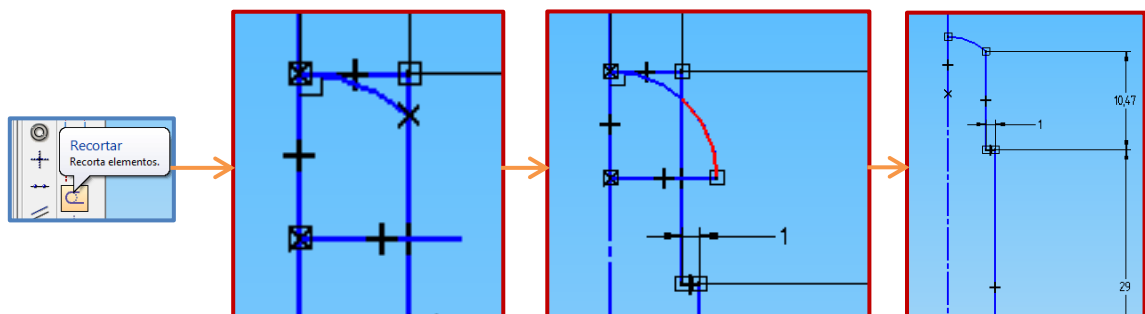
Lo siguiente es dibujar el perfil alrededor del eje. De igual manera que se ha realizado con la línea usada como eje, hay que crear líneas rectas que definirán el tamaño del modelo que estamos creando. Las dimensiones, las cuales se muestran acotadas en las imágenes, son tomadas a partir de la boquilla real.



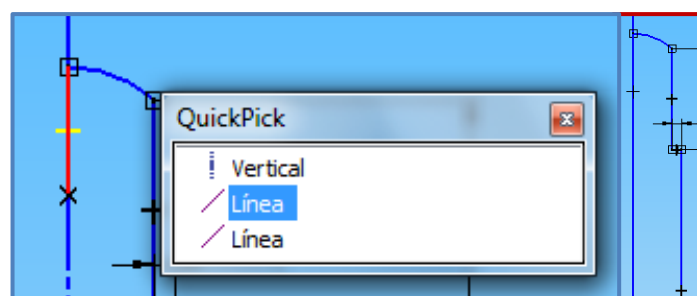
El siguiente paso es dibujar la parte de una semiesfera definida en el tramo de salida del interior de la boquilla. Para ello hay que dibujar desde el extremo dos líneas de 6 mm que nos sirvan de ayuda en la creación del arco (en rojo en la primera foto) como ayuda para dibujar el posterior arco que definirá la forma circular de la salida. Después se selecciona la herramienta arco según centro, y clicanado en el centro y en un extremo definimos un cuarto de circunferencia.



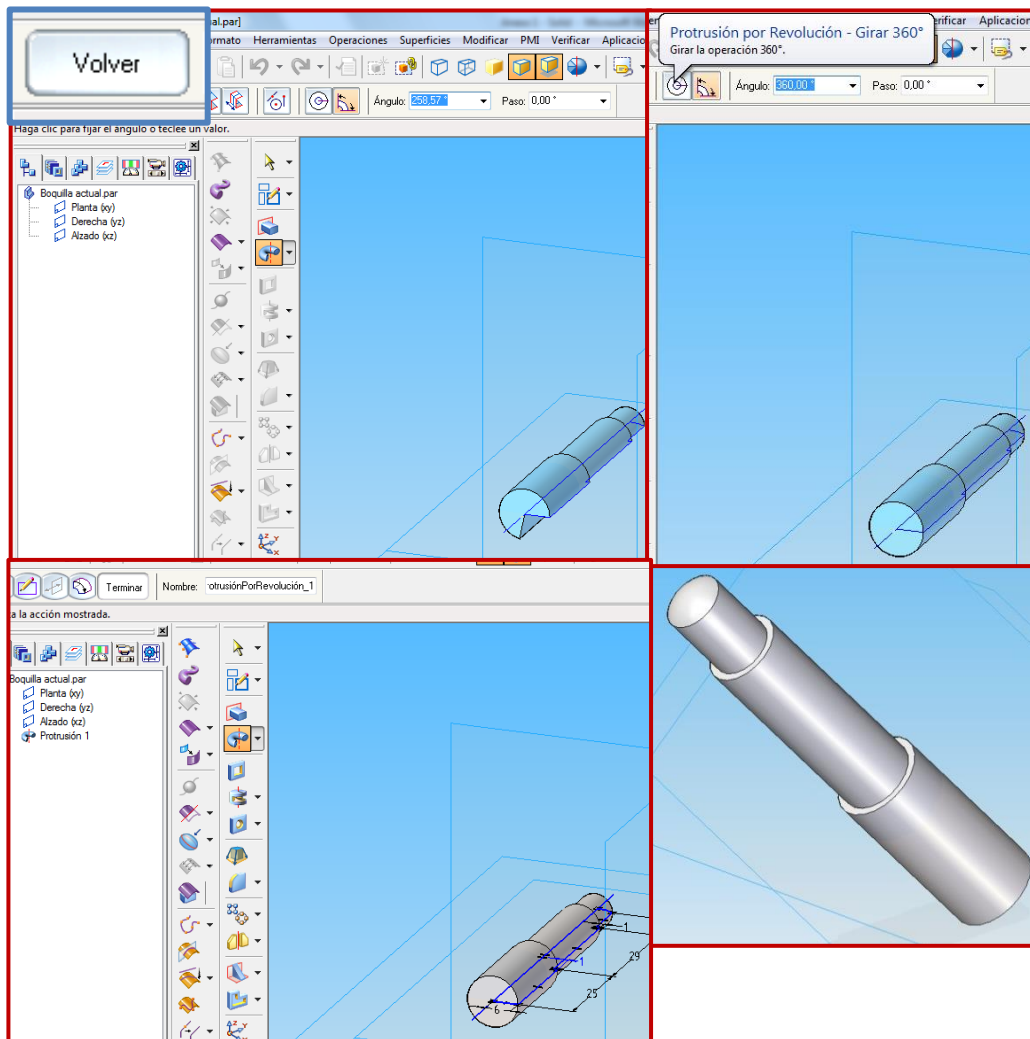
Ahora bien, como se ve en la figura, sobran muchas líneas auxiliares en el dibujo. Lo más sencillo es usar la herramienta recortar. Una vez seleccionada recortara la línea elegida, hasta su que se encuentre con una línea cruzada. Con ello eliminamos todas hasta conseguir la forma elegida, como se muestra en las siguientes imágenes.



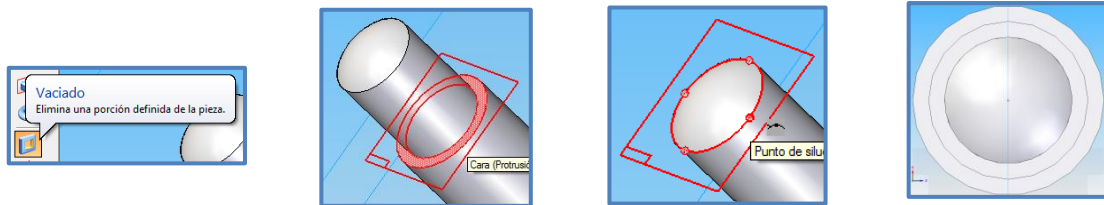
Existe otra manera de borrar líneas, para borrar la línea que por ejemplo se queda detrás del eje. Usando la herramienta seleccionar, y como hay dos líneas al colocarse encima de ellas. En la flecha aparecen un dibujo que indica superposicion, al presionar el boton izquierdo se muestran todas las líneas, se selecciona la que se quiere borrar y se suprime. Por último queda unir los extremos libres en contacto con el eje para cerrar la forma y acabar el dibujo.



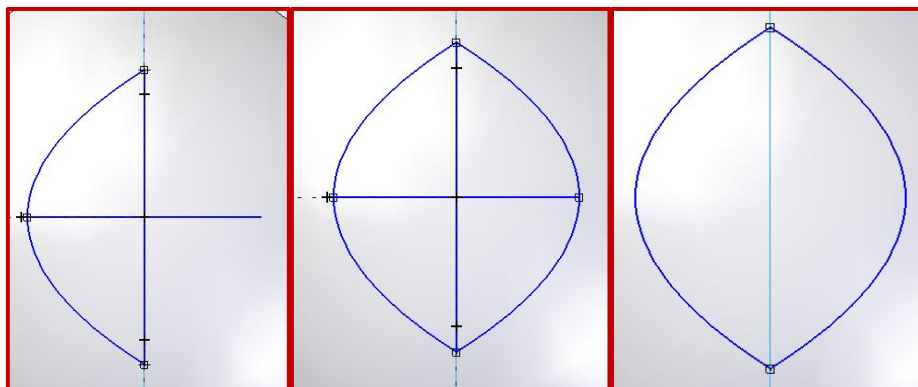
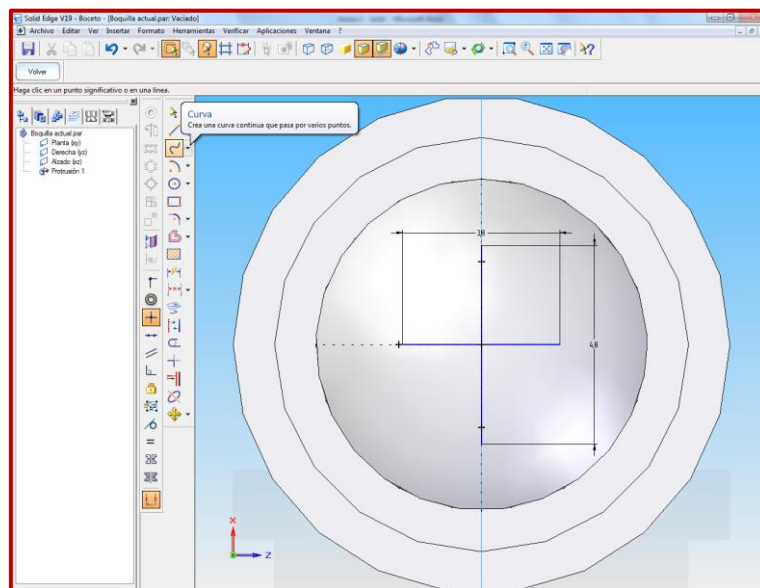
Una vez dibujado el perfil, hay que presionar el botón de volver, y se puede ver como se dibuja el perfil. Para asegurar la revolución completa hay que presionar el botón circular, tras lo que demos el botón y se da el botón terminar.



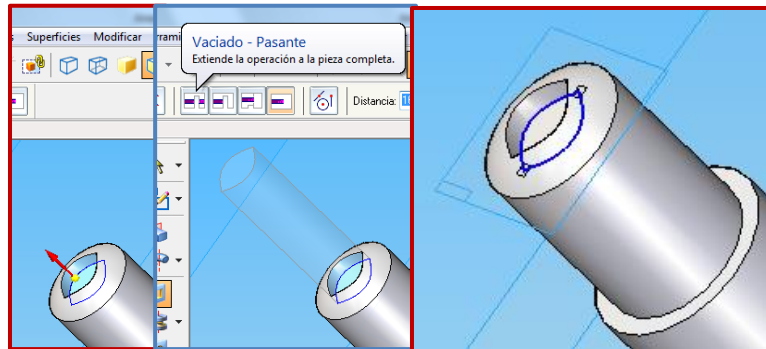
Lo siguiente es realizar el orificio. Hay que tener en cuenta asegurar la planicidad de la superficie plana, para una correcta simulación y cálculo de gasto másico. Primero realizamos un vaciado. El plano escogido es en el fin de la curvatura hasta el exterior. Por ello, escogemos la opción de plano paralelo en lugar de plano coincidente. Pinchamos el plano del cambio de sección y después el la superficie. A continuación de muestran los pasos:



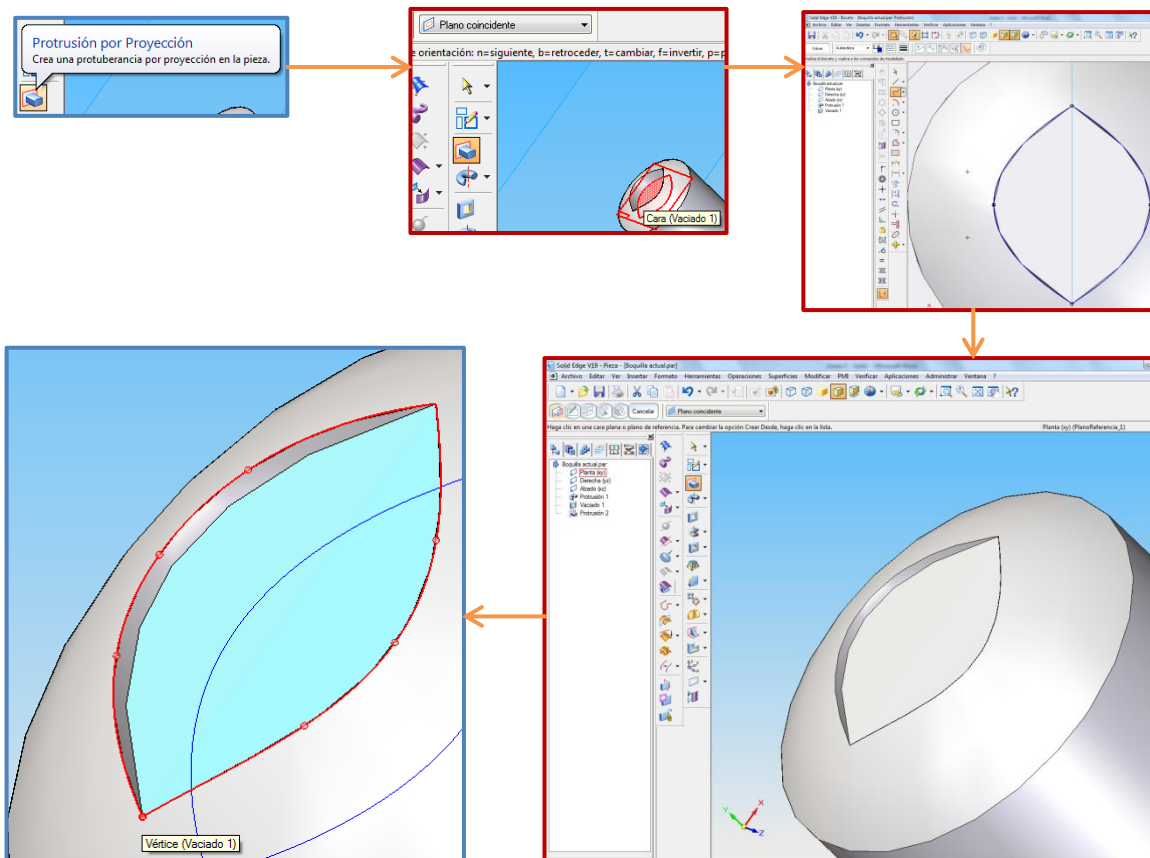
En este plano, dibujamos en el centro una dos líneas de 3,8 mm y 4,8 mm. Después con la herramienta curva unimos los dos vertices de la línea de 4,8mm pulasando también en el de 3,8mm y para finalizar hay que pulsar el botón izquierdo. Como se ha hecho en los apartados anteriores, seleccionamos la distancia, y después la direccion. Se presiona terminar y ya estará el hueco del orificio realizado.



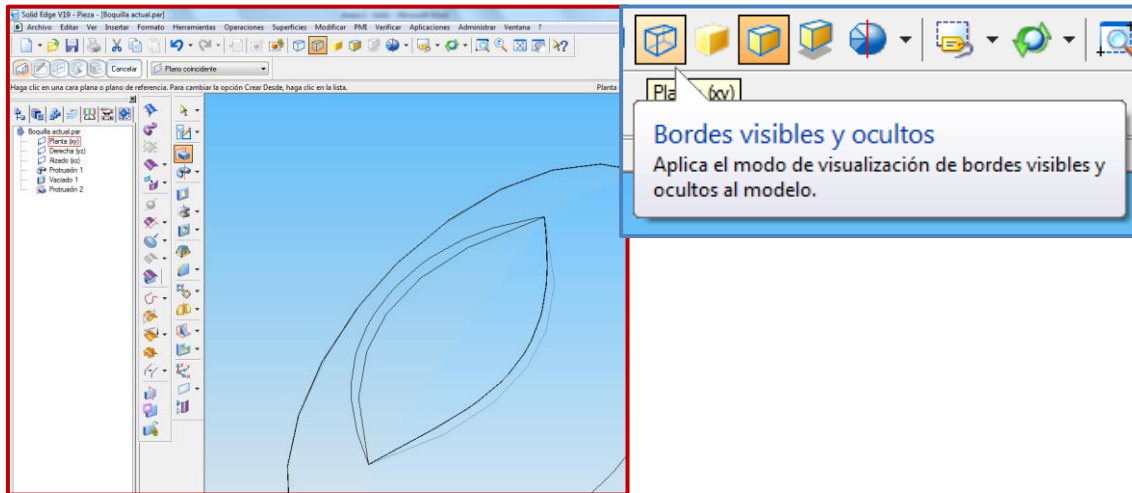
El siguiente paso es realizar el vaciado, primero indicando la diección, hacia afuera. Después se debe poner una distancia de vaciado, poniendo 12mm como valor o usando la pestaña de vaciado pasante. Una vez hecho esto no hay nada mas que presionar el botón de terminar.



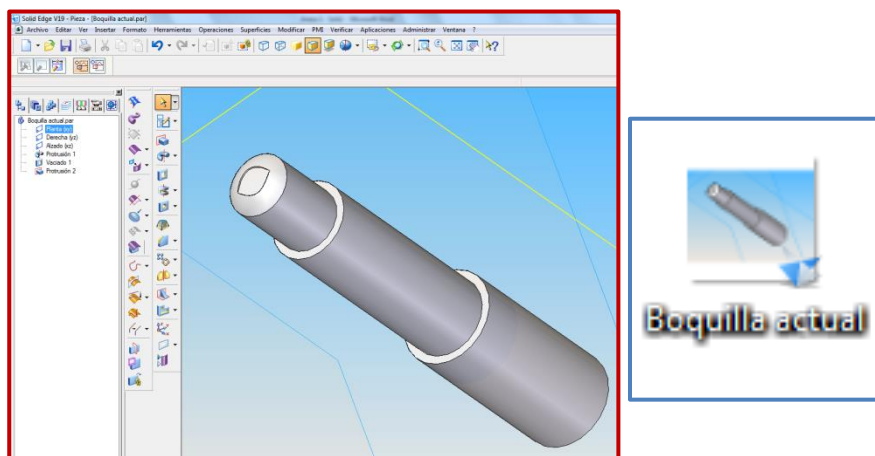
Por último queda realizar la protusión que permita el correcto diseño de la parte interna. Así que clicando en el boton de protusión, se selecciona el plano coincidente al seleccionnado para que comienze el vaciado para el orificio. Volviendo a dibujar el mismo perfil de elipse, presionamos 'Volver'. El relleno de la protusión se debe de realizar hasta donde comienza la abertura, en el cual aperecerá un icono de borde al lado del puntero como ayuda.



Se comprueba que no hay ningún error que pueda dar lugar a errores posteriores en la implementación en FLUENT. Lo primero es que no hay ningún mensaje de error en el cuadro de las operaciones a la izquierda, lo que impediría que FLUENT cargara el modelo. La otra comprobación es clicar el botón de líneas, para comprobar que no hay ningún borde ni ninguna línea sin borrar.



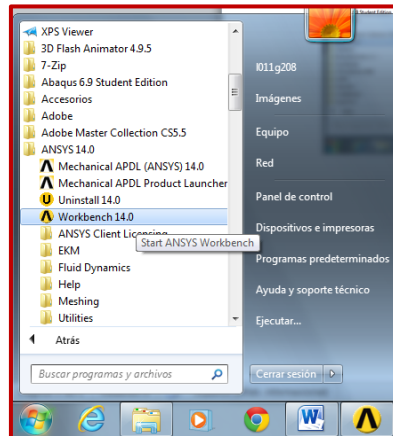
Modelado el cuerpo interno, que será la zona fluida, solo hay que guardar el archivo. Hay que tener constancia de donde queda guardada, pues después habrá que cargar la pieza.



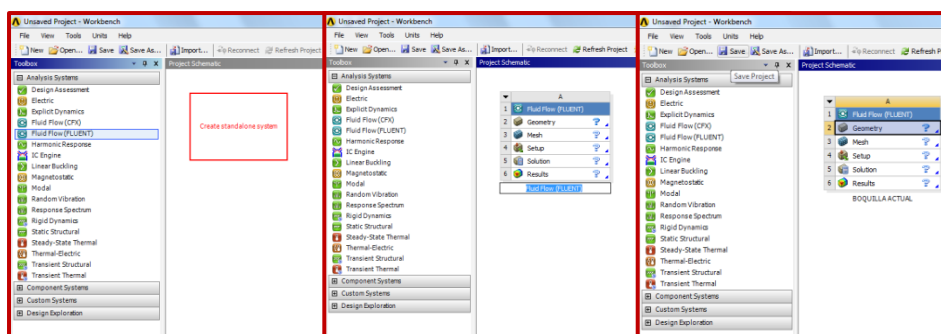


# ANEXO II: SIMULACION DE LA ZONA FLUIDA DE UNA BOQUILLA

El objeto de este tutorial es usar un programa de simulación numérica de flujos para la resolución de un problema fluido, caracterizado al interior de una boquilla. El programa que se usara será FLUENT, que pertenece al paquete de programas ANSYS WORKBENCH 14. Para empezar hay que abrir el programa:

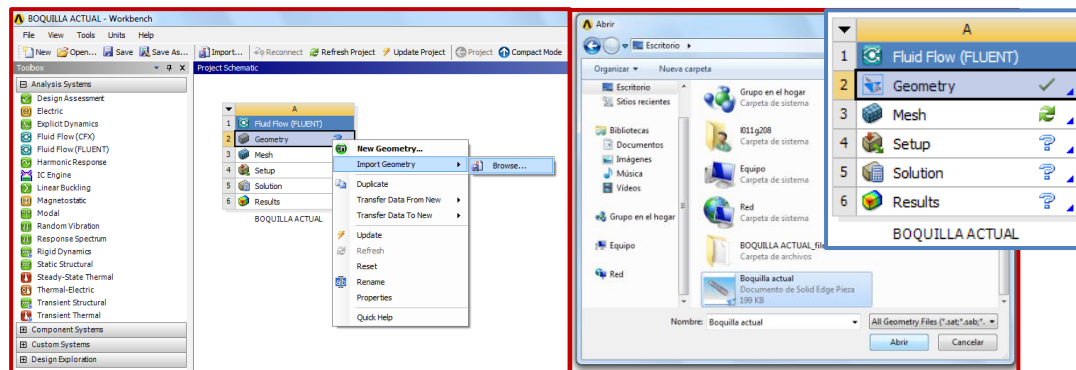


Una vez abierto WORKBENCH, se presenta la siguiente disposición. En el apartado de la izquierda aparecerán los módulos con los que se puede trabajar. Para abrir un proyecto de FLUENT hay que pinchar y arrastrar a la ventana de la derecha de cualquiera de los módulos. En este caso simularemos un fluido, por lo que arrastraremos el módulo a la venta PROJECT SCHEMATIC. Para dar nombre al proyecto hacemos doble clic en el nombre y le llamaremos BOQUILLA ACTUAL. A continuación se deberá guardar el proyecto, en este caso se llamará boquilla actual.

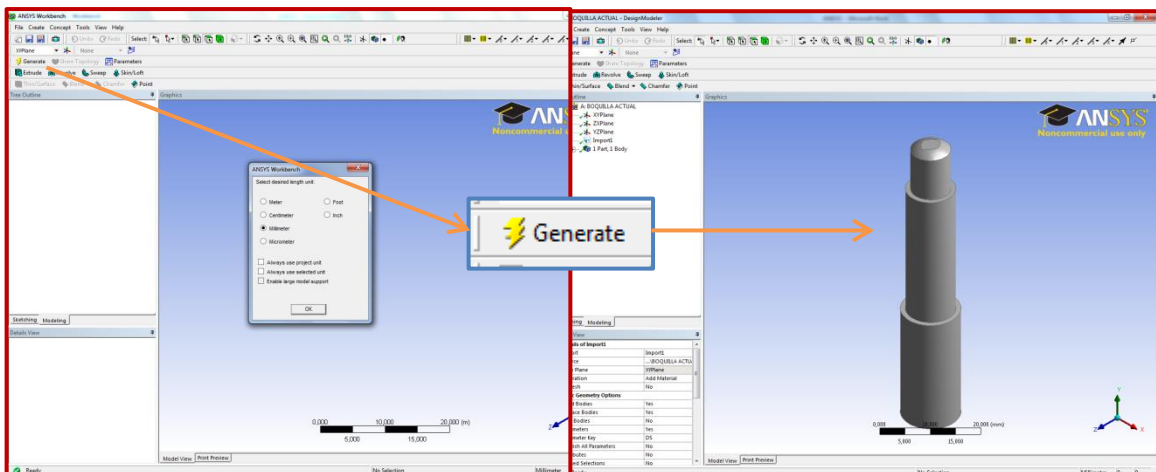


FLUENT divide el proceso de simulación en pasos, los cuales se pueden ver en el proyecto en el PROJE SCHEMATIC. El primer paso es crear la geometría, con la función DESING MODELER. Esta es una herramienta de modelización en 3D, bastante primitiva y no permite crear formas complejas. Por ello debemos de importar el modelo geométrico del interior de la boquilla, explicado en el ANEXO I.

Para importar el archivo hay que clicar en el botón izquierdo sobre el PASO 2 GEOMETRY. Se desplegará un menú donde debemos clicar en IMPORT GEOMETRY. En el cuadro de dialogo habrá que buscar el archivo de SOLID EDGE (.par) de donde lo hayamos guardado previamente. Tras aceptar, si se carga correctamente aparecerá un tic en el módulo GEOMETRY.

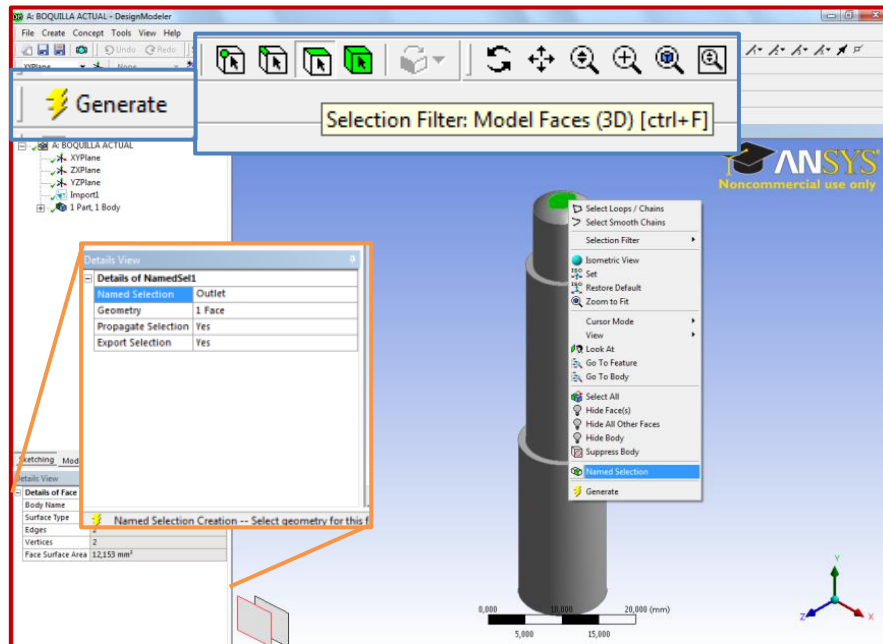


Se abre a continuación este módulo, clicando dos veces sobre geometry. Se abrirá finalmente el subprograma mencionado anteriormente, DESING MODELER. El programa comienza pidiendo la escala de trabajo, y puesto que el modelo esta realizado en milímetros, usaremos esta escala. Una vez aparezca la pantalla de trabajo, hay que presionar GENERATE para que aparezca en pantalla el modelo:



El siguiente paso es muy importante y condicionara el modelo. FLUENT es un programa inteligente y cuando se abre un modelo, el propio programa reconoce y caracteriza el modelo. Por tanto es necesario, que para que cargue correctamente el modelo y no de error, identificar las zonas del modelo.

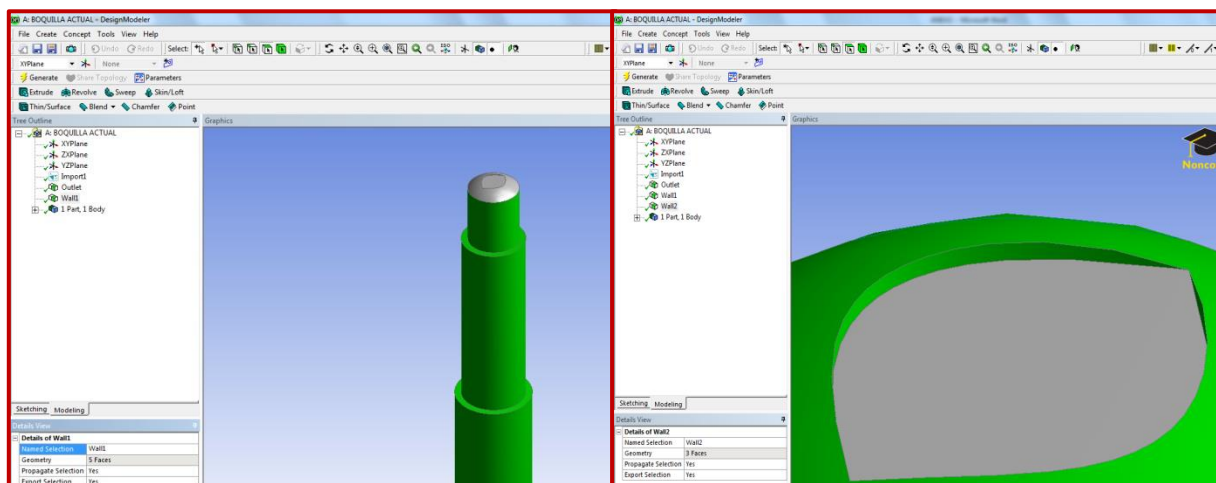
Haciendo clic en selección de caras, seleccionamos el orificio de salida, que se coloreara de color verde y haciendo clic con el boton izquierdo se debera pulsar CREATE NAMED SELECTION. Abajo a la izquierda aparece un cuadro donde se nombrará la zona.

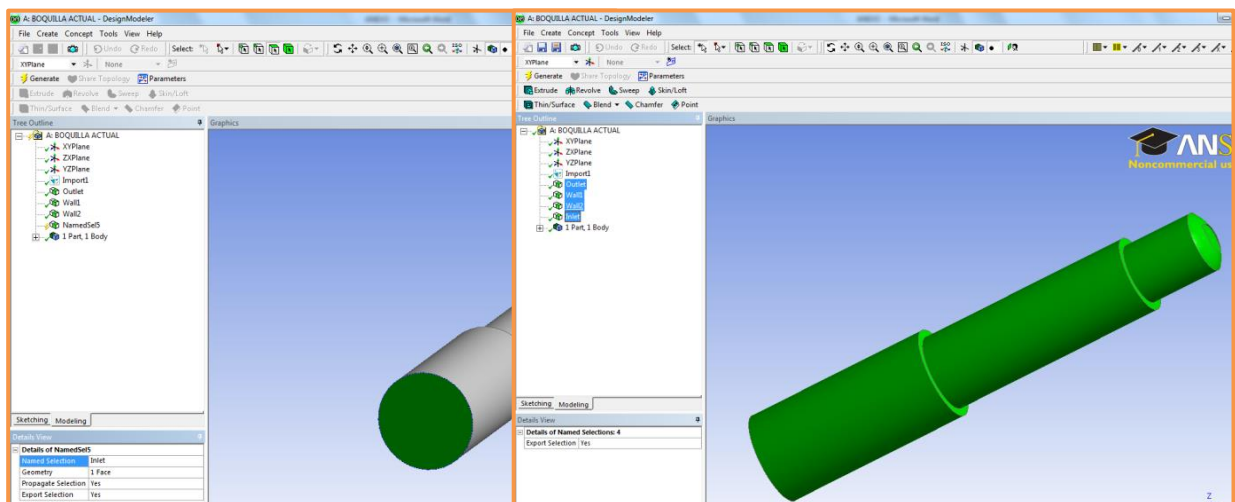


Los nombres no son escogidos al azar, si no que deben ser escogidos en función del tratamiento posterior que tendrán:

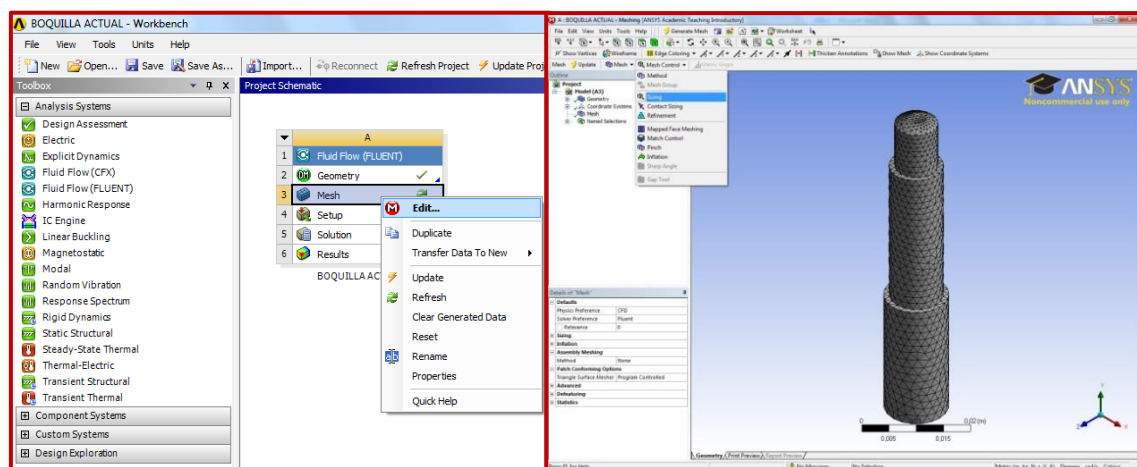
- Para el orificio de salida el nombre sera Outlet
- Para la cara opuesta, la entrada se llamara Inlet
- La zona de los cilindros, y la seccion intermedia seran Wall 1
- La zona del orificio y la pared curvada, Wall 2

Tras realizar el proceso descrito en el párrafo anterior con las diferentes zonas. Después comprobamos que toda la superficie está cubierta, y guardamos y cerramos el DESING MODELER:





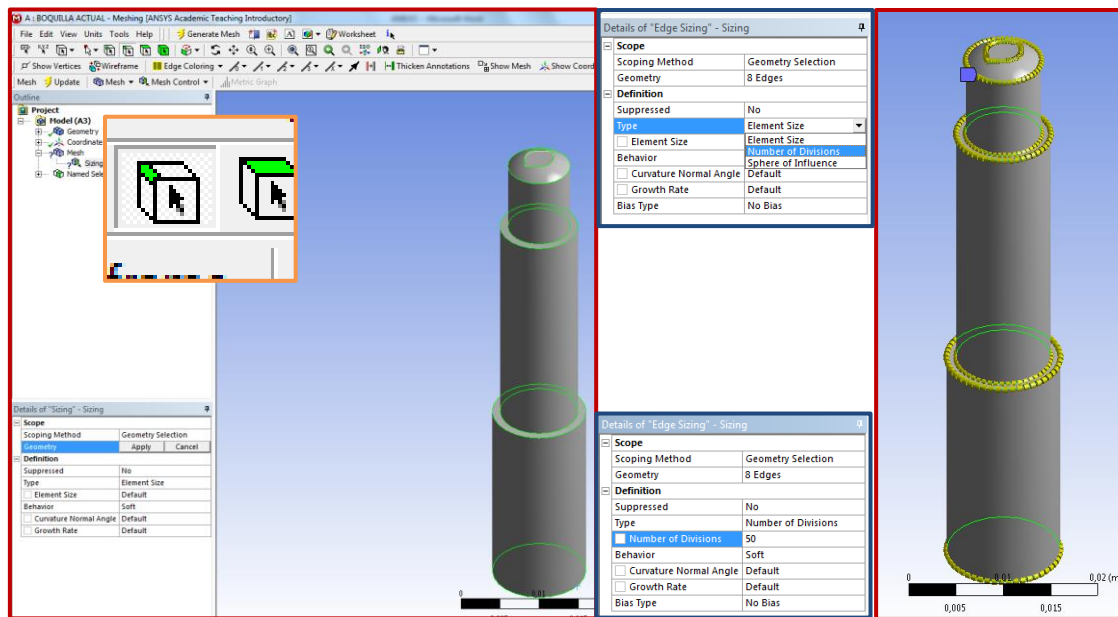
Tras la comprobación de las diferentes zonas, se debe guardar el proyecto. De vuelta a la interfaz de ANSYS vemos que aparece un tic en GEOMETRY, señal de que todo está correcto. Continuamos con el paso MESH, donde se mallará la zona fluida del modelo. Tras clicar dos veces sobre el apartado o desplegar el menú y pulsar editar, se abre el subprograma de mallado. Tras la carga del mismo, aparece el modelo. Para crear la malla, hay que presionar el botón UPDATE, tras el cual se creará una malla de elementos con forma de cuadriláteros.



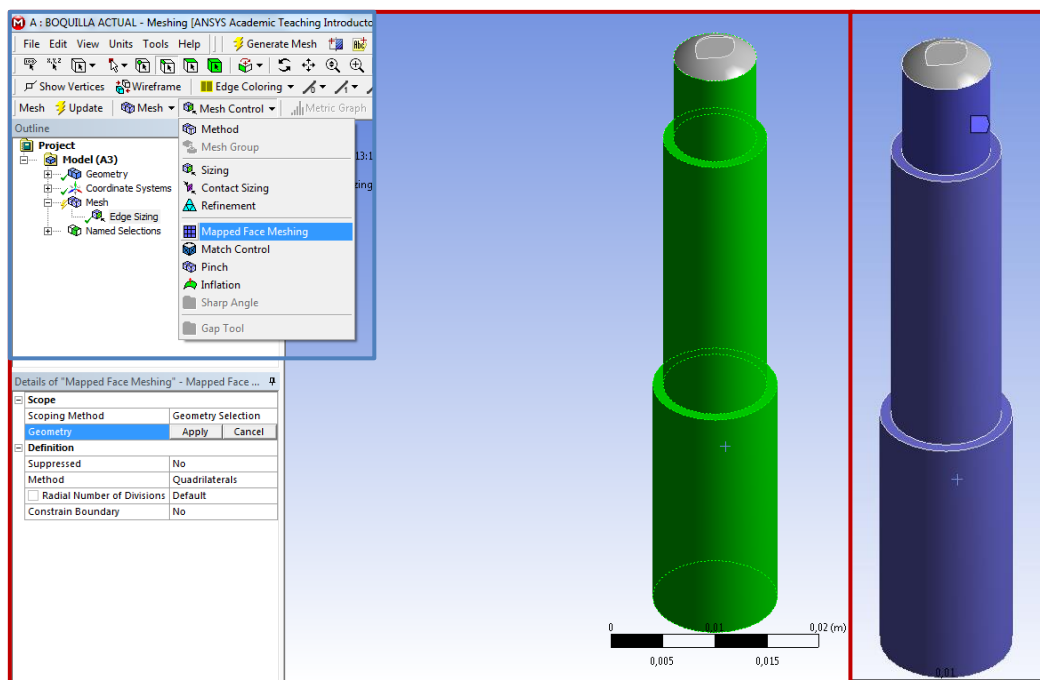
Se puede apreciar que la malla no es muy fina. Hay que tener en cuenta que las simulaciones se están haciendo con la versión estudiante, lo que limita el número de celdas usadas. Para retocar la malla, existen varios métodos. Para las mallas de todos los modelos, seguiremos los mismos pasos y los mismos parámetros con el fin de hacer todas las mallas parecidas. Esto hará que los errores entre comparaciones de los distintos modelos disminuyan.

Para comenzar, habrá que pulsar el botón de MESH CONTROL, tras lo que se abrirá un menú desplegable (como se muestra en la imagen superior). El primer parámetro que caracterizara la malla, será SIZING, un comando que permite controlar el número y tamaño de celdas de una zona. Tras presionarlo en el cuadro de dialogo de abajo a la izquierda, pide seleccionar las zonas, seleccionamos el botón selección de línea EDGE y con CTRL pulsado seleccionamos todos los diámetros y los dos arcos del orificio, como se muestra en la figura de la derecha.

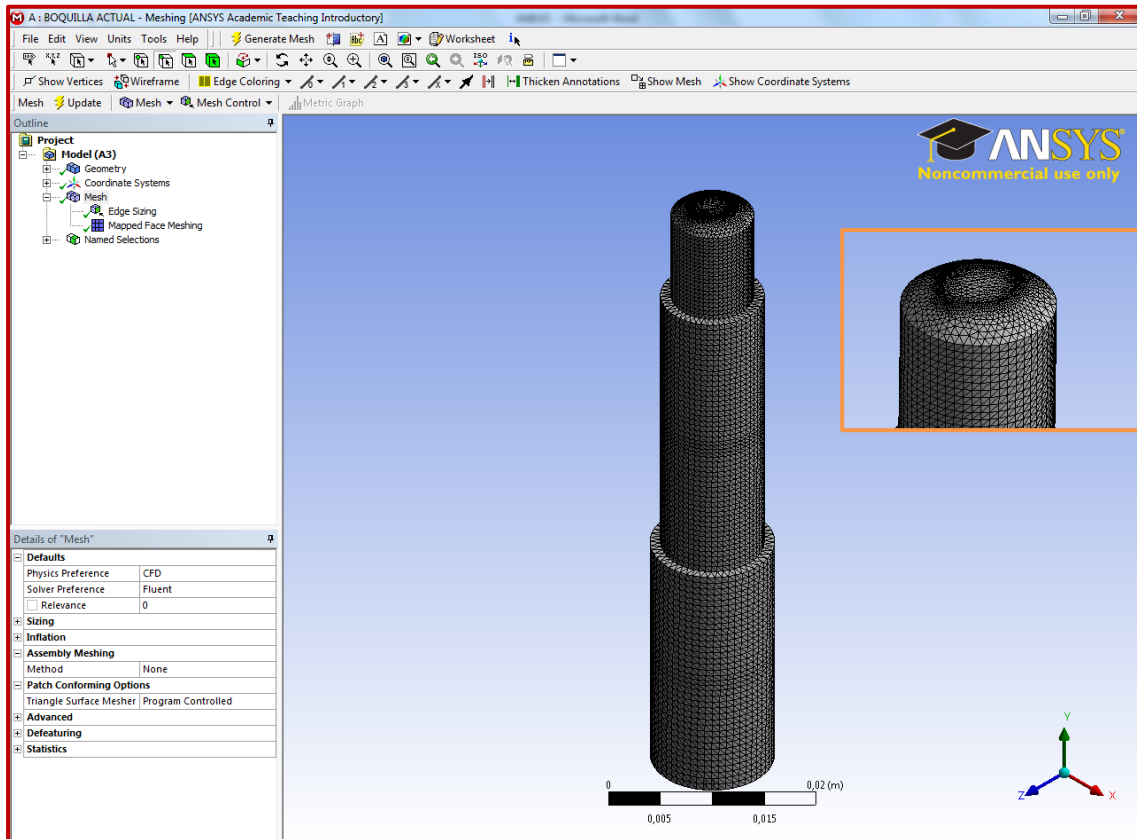
Tras aplicar la selección, se debe cambiar del menú TYPE a NUMBER OF DIVISIONS y poner 50. Podrían ser más, pero se corre el riesgo de aumentar demasiado el número de celdas y que salte error. Hay que tener en cuenta que cuanto más fina sea la malla mejor será, pero también más lenta será la resolución.



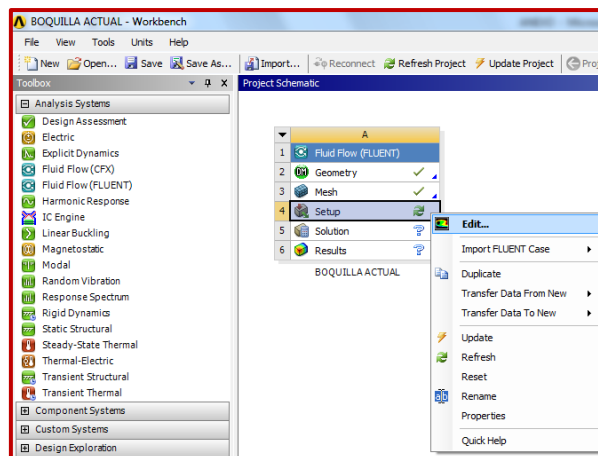
El siguiente paso para la definicion de la malla, es ordenarla. Esto hará que disminuya el error y facilite el cálculo. Para ello hay que ir a MESH CONTROLS y seleccionar las caras con la herramienta FACE, al lado de EDGE, que corresponden a las superficies de Wall2.



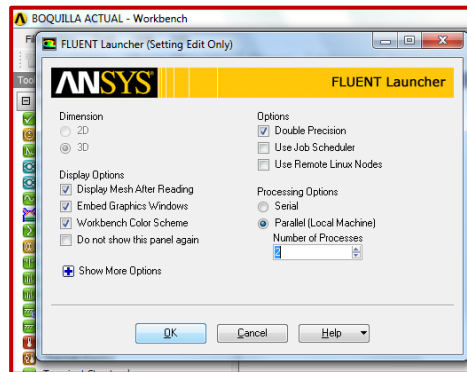
Después para ver el resultado, tras presionar el boton UPDATE, se calculará una nueva malla, mas fina y ordenada. Esta malla ademas tiene mas celadas cerca del orificio de salida ya que será la zona más crítica del cálculo. Quedará de la siguiente manera:



Tras comprobar la malla, volvemos al PROYECT SCHEMATIC del WORKBENCH. Si todo esta correcto debe de aparecerá un nuevo ítem en el lugar del paso MESH. En el paso 4, SETUP, se establecerán las condiciones del problema. Clicando dos veces o presionando el botón editar.



Una vez se abre el FLUENT, aparece un cuadro de diálogo sobre cómo se quiere que trabaje el programa. Hay que activar el botón de doble precisión para reducir los errores, y poner un procesamiento en paralelo con el fin mejorar el procesamiento de tanta información, si el ordenador posee un doble núcleo o más.



El programa se inicializará tras este paso. En el proceso de la carga en el cuadro, de diálogo se puede ver información adicional sobre el caso cargado. En este cuadro aparecerán datos de la malla (número de celdas, nodos, forma), también se pueden observar las zonas cargadas descritas y con los colores asignados. Por otro lado, este cuadro de diálogo es muy importante a lo largo de todo el proceso SETUP por lo que si hubiera algún error, o cambios importantes el programa los comunica a través de él. Si se carga correctamente, aparecerá la malla. Se verán todas las zonas menos la interior. Las paredes se mostrarán en color blanco, el orificio de salida en color rojo y el de la entrada en color azul.

```

93666 tetrahedral cells, zone 2, binary.
Building...
mesh
  auto partitioning mesh by Metis (Fast),
  distributing mesh
  parts...
  faces...
  nodes...
  cells...
materials,
interface,
domains,
zones,
wall2
wall1
outlet
inlet
boquilla_actual.par
interior-boquilla_actual.par
parallel,
Done.

```

host	net	processor	OS	Architecture	Nodes	Fluent Host
n1	pcmpl	L011G208	Windows-x64	4132	0	404
n1	pcmpl	L011G208	Windows-x64	4976	0	1
n0*	pcmpl	L011G208	Windows-x64	2708	0	0

Selected system interconnect: default

Cleanup script file is C:\Users\L011g208.AIG.005\cleanup-fluent-L011G208-4132.bat

> Reading "C:\Users\L011g208.AIG.005\Desktop\BOQUILLA ACTUAL\_files\dp0\FFF\MECH\FFF.msh"...  
Using buffering for scanning file.

```

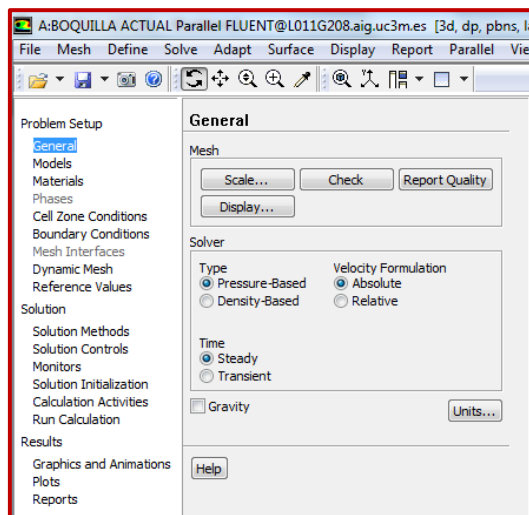
12035 nodes, binary.
7946 nodes, binary.
179908 triangular interior faces, zone 1, binary.
306 triangular velocity-inlet faces, zone 5, binary.
671 triangular pressure-outlet faces, zone 6, binary.
11880 triangular wall faces, zone 7, binary.
1831 triangular wall faces, zone 8, binary.
93666 tetrahedral cells, zone 2, binary.

```



Tras la carga, se pasa a la caracterización del problema mediante la columna de la izquierda. En ella FLUENT, presenta a la izquierda una serie de comandos. Para una correcta carga del problema es necesario ir pasando por todos los pasos de la manera indicada. En el proceso de definición del problema, PROBLEM SETUP se establecieron todas las condiciones y características del problema. El primer paso es GENERAL. Se puede comprobar y editar la malla en el apartado mesh, pero debido a que el número de celdas está limitado y está bastante ajustado, por lo que no se puede redefinir más la malla. En el apartado SOLVER caracteriza a grandes rasgos el problema. Las casillas que deben estar marcadas son:

- *Pressure Based*: Debido a que los datos conocidos son los de presión, e interesa conocer los datos dinámicos del fluido, no los cambios internos. Esto también caracteriza si el fluido es agua (densidad más o menos constante) o aire.
- *Velocity absolute*: son valores de velocidad.
- *Type*: es estacionario, como se demostró en el apartado de problema fluido.

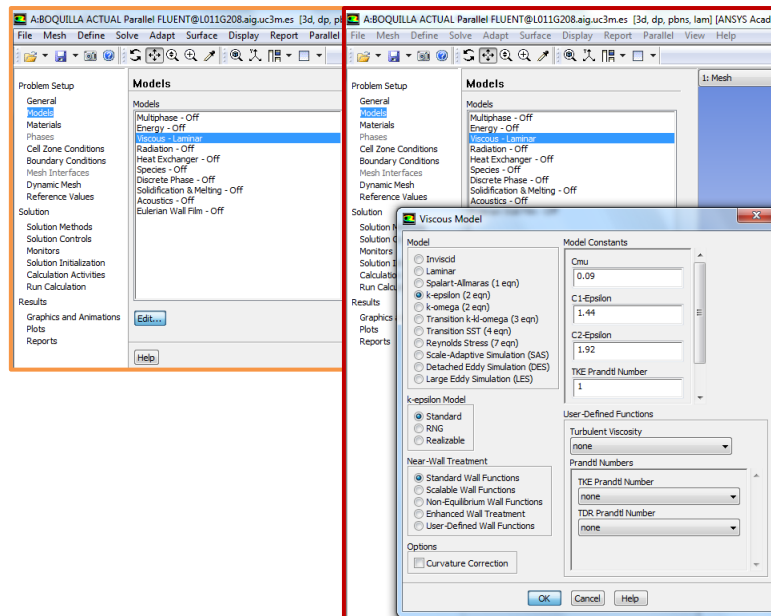


En MODELS se activan todas las ecuaciones que el programa vaya a usar para resolver, a parte de las de balance de continuidad y cantidad de movimiento. Para nuestro caso nos afectarían dos ecuaciones extra:

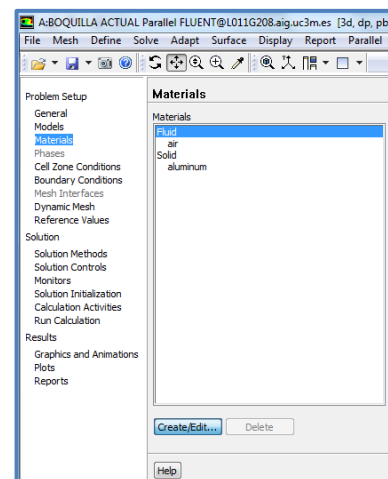
- La primera es la ecuación de energía. En este caso no hay calentamiento ni enfriamientos, ni trabajos. Aunque el fluido está a 60° C aproximadamente, debido al caudal y la velocidad se puede aproximar a que no varía la temperatura, y por tanto podemos desactivar esta ecuación. Es recomendable hacerlo porque hace necesario un gran volumen de cálculo en la iteración y no responde a ningún aspecto de los que son necesarios para el caso.

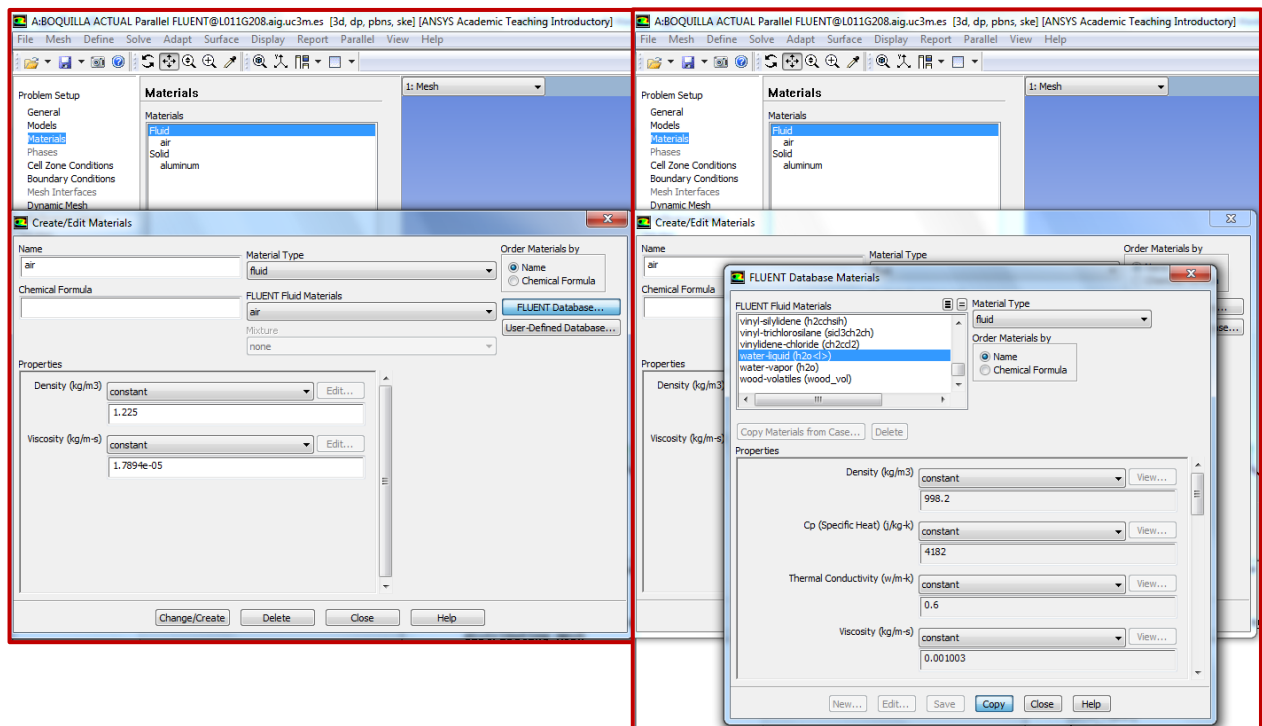
- La segunda ecuación es la del modelo de turbulencia. En el apartado VISCOUS, hay que pulsar dos veces y cambiar laminar en el cuadro de dialogo por uno de los modelos de turbulencia. Un buen modelo que se adapta al caso es k-epsilon (K-ε).

Este modelo de turbulencia K-epsilon es uno de los modelos más comunes de la turbulencia. Su rango de aplicación es bastante alto aunque no funciona correctamente en caso de gradientes de presión adversos grandes. El modelo consta de dos ecuaciones. La primera variable K es la energía cinética turbulenta. La segunda variable  $\epsilon$ , es la disipación turbulenta. En otras palabras, es la variable que determina la escala de la turbulencia, mientras que la primera variable, determina la energía en la turbulencia. En la ayuda que proporciona FLUENT, habla de que los parámetros predeterminados funcionan para varios casos, entre los cuales se habla del fluido en tuberías con gran velocidad, que es el caso, por tanto no tocaremos ningún parámetro. Se debe activar la casilla ENHANCED WALL TREATMENT para mejorar la simulación del fluido en la zona de contacto con la pared, que en este modelo es un parámetro condicionante.

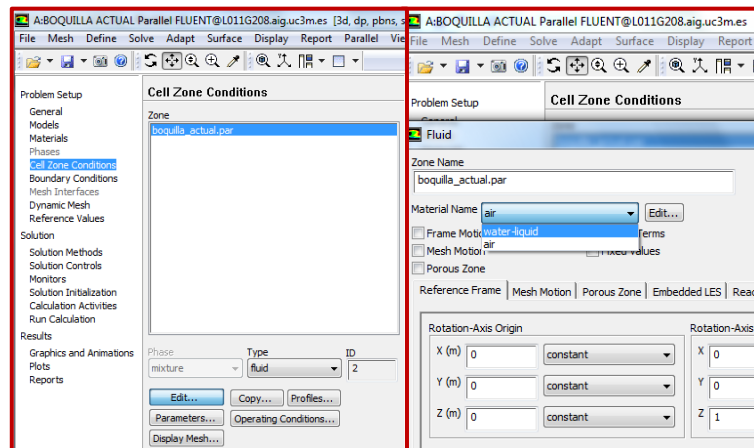


En MATERIALS se definen los materiales. En este problema solo se usa agua, por lo que en este caso hay que hacer que este disponible este material. Para añadirle presionamos la pestaña CHANGE/EDIT. A continuación se abre un cuadro de dialogo y puede añadir los datos manualmente o añadirlos de la base de datos del FLUENT. Aunque el agua está a 60 grados, las propiedades no varían casi nada y no afectan casi a los resultados. Como se van a hacer muchas simulaciones de varios casos, importaremos el agua a 25°C cargado de la base de datos de FLUENT.



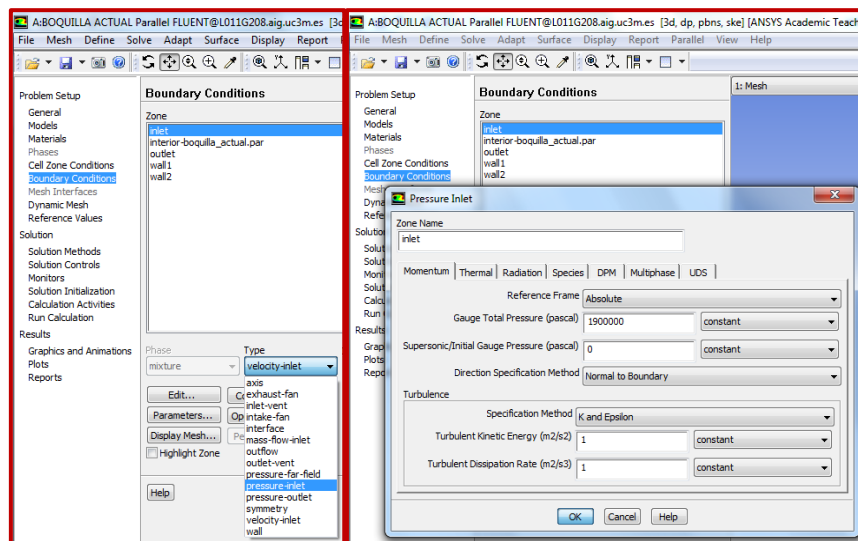


El siguiente paso es asignar a nuestro modelo el material. Para ello hay que pasar al apartado CELL BOUNDARY CONDITIONS. En la ventana se puede ver la zona boquilla\_actual.par. Esta zona el programa la usa como la geometría límite. Por defecto el programa identifica la zona como fluida. El siguiente paso caracterizar la zona. Para ello presionamos el botón de Edit. En el siguiente cuadro de diálogo esta por defecto la zona fluida caracterizado como aire. Para cambiar el material a agua, presionamos en la pestaña, se desplegará un menú desplegable y se deberá de cambiar por agua.

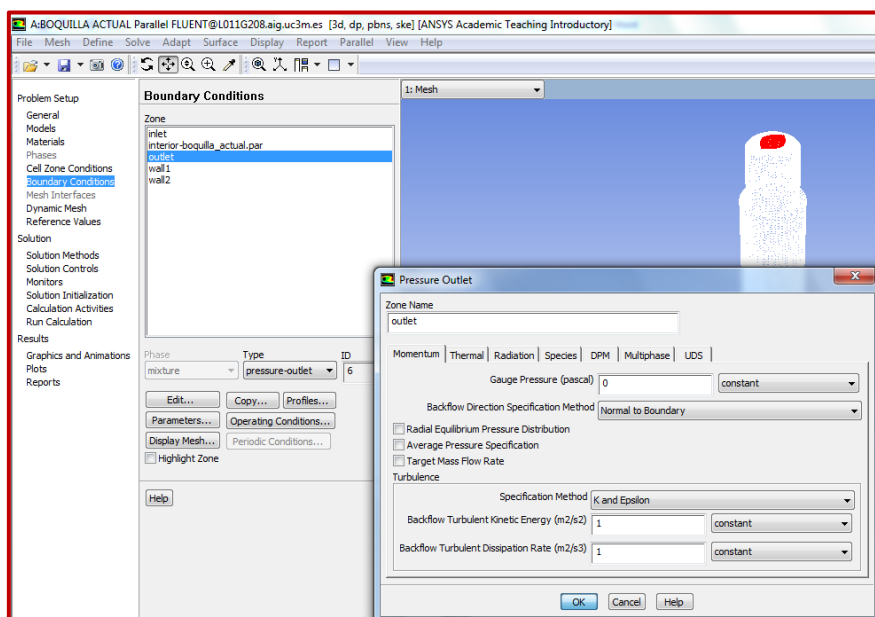


EL siguiente paso es establecer las condiciones de contorno de las superficies. Aquí aparecen todas las partes que componen el modelo. Se puede distinguir las zonas que hemos caracterizado:

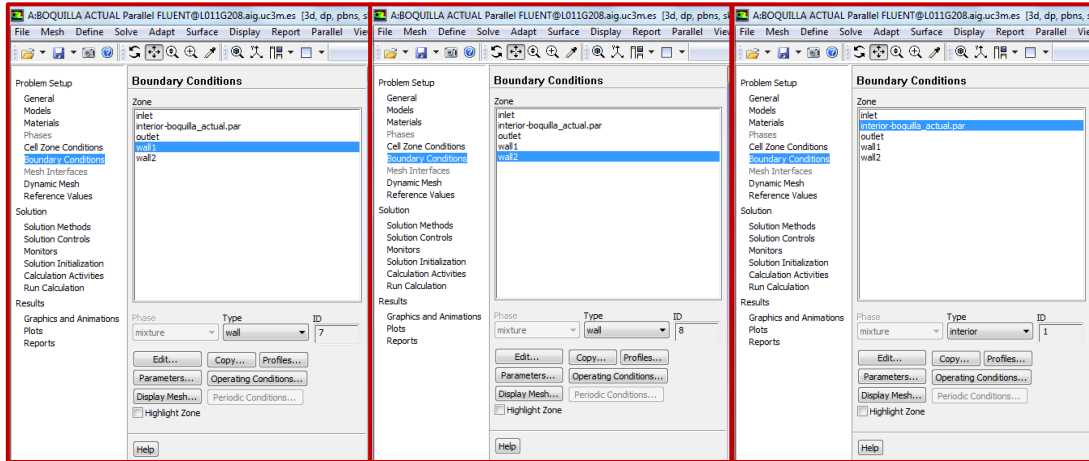
- **Inlet:** es la entrada, de ella se conoce como dato que la presión son 20 bares. El cuadro de diálogo permite basar la presión como absoluta o manométrica o relativa. Por tanto como se sabe que en la salida, la presión es la atmosférica, un bar, como valor de presión absoluta pondremos los 19 bar, la diferencia real. Para ello, hay que seleccionar la salida como tipo Pressure Inlet, y se deberán introducir el valor de los 10 Bar en Pascales, que son 1.900.000 Pa.



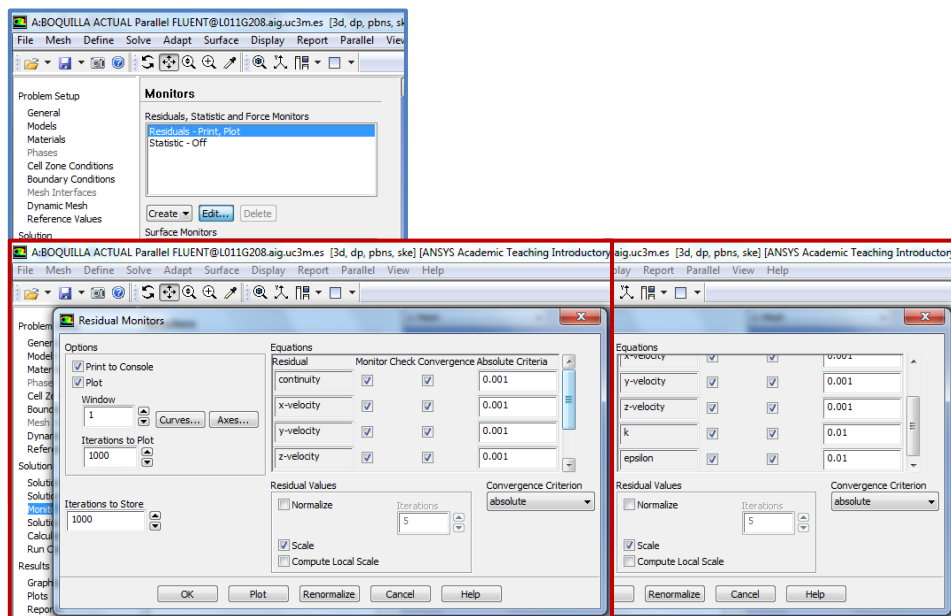
- **Outlet:** La salida, como ya se ha comentado antes, el agua en el momento que abandona la boquilla y se pone en contacto con el ambiente, la presión decae hasta la atmosférica. Como se conoce la presión se establece como Pressure Outlet. Debido a que ya hemos tenido en cuenta la diferencia de presión, el valor que se debe de establecer es el de 0 Pa.



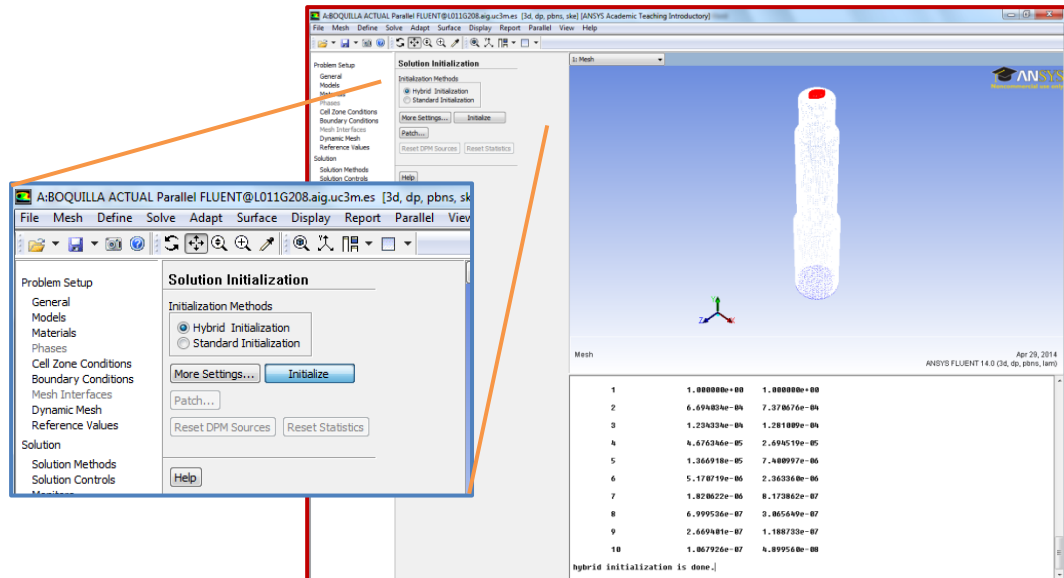
- *Wall1*: es la pared circular, se caracteriza como wall.
- *Wall2*: es la pared recta, se caracteriza como wall también.
- *Interior-boquillaplana.par*: hace referencia la malla interna, creada por defecto por el programa. El programa ya la establece por predeterminado como interior.



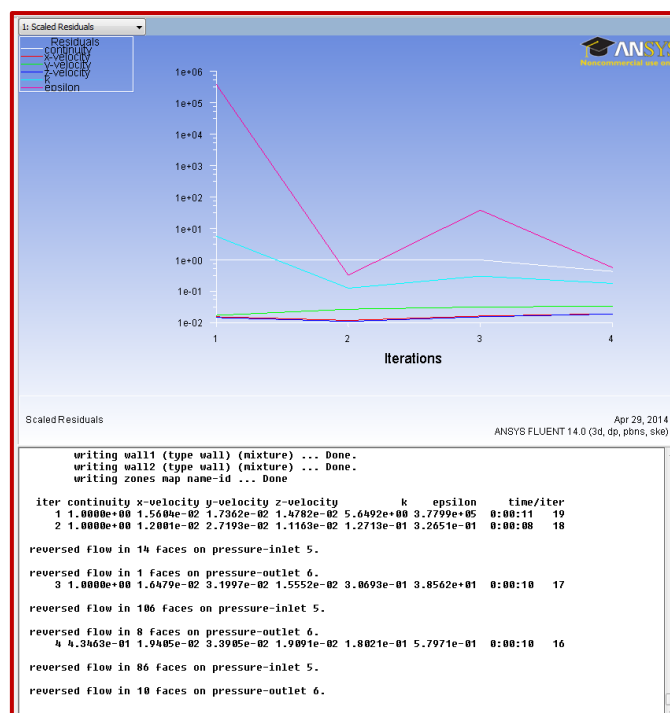
El resto de apartados no hay que cambiar nada hasta el punto de MONITORS. Aquí se establecerán parte de los criterios de convergencia del problema. Los valores de convergencia que hay que cambiar son los de la turbulencia, debido a que llega a un punto en el que el modelo no puede bajar más la precisión, y lo que interesa que convenga es el resto de los parámetros.



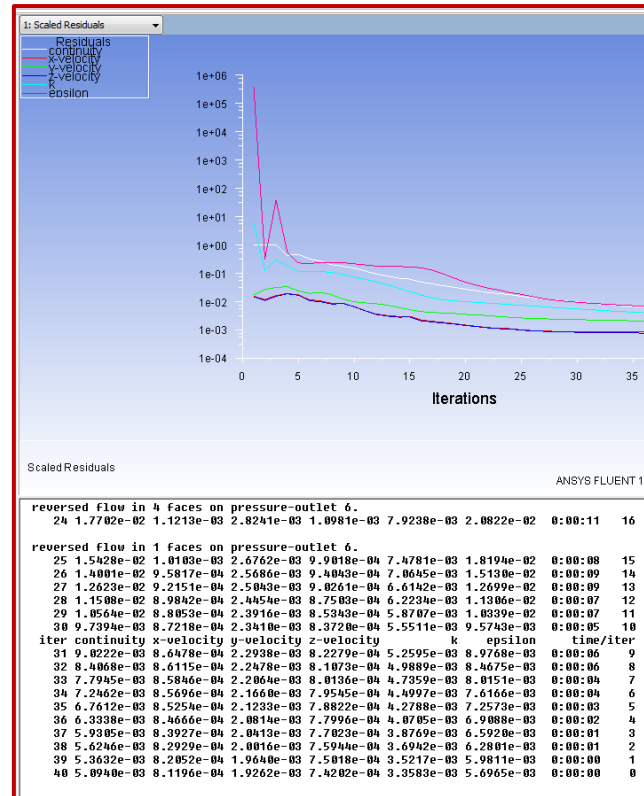
El siguiente paso es dar unos valores previos para ayudar al programa a comenzar las iteraciones. Esto es en el siguiente paso INITIALITION. Esta versión permite la inicialización híbrida, que presenta una serie de iteraciones previas para reducir el volumen de cálculo partiendo de valores cercanos.



Para iterar se pide un establecer un número de iteraciones por si no se llegase a que los errores estén por debajo del límite propuesto y se detenga el cálculo. Como valor se seleccionara 250 iteraciones. Tras estos pasos presionamos el botón CALCULATE. El programa calculará mediante una sucesión de iteraciones, hasta que la solución converja. Después de las primeras iteraciones podemos observar:



Vemos que al principio existe parte del fluido que retorna. No es motivo de alarma, porque el número de caras según siguen las iteraciones hasta que a partir de la iteración 25 el flujo se estabiliza.



Asi pues en la iteracion 56 se puede ver que el calculo converge.

```

55 4.9299e-04 1.0824e-05 2.0080e-05 1.0203e-03 3.3105e-03 8.3800e-03
iter continuity x-velocity y-velocity z-velocity k epsilon
! 56 solution is converged
56 4.7218e-04 1.6375e-05 2.0194e-05 9.9418e-04 3.2662e-03 8.2926e-03

```

Hay que tener en cuenta que el programa ofrece soluciones aproximadas, esto es debido a que el metodo de resolusion es iterativo. Es decir, que cada vez que se calcula la solucion y dependiendo de la potencia del ordenador los datos resultantes y posiblemente el número de la iteración en la que esto ocurra cambien. Lo siguiente será comprobar la resolución de la malla.

Para este paso habrá que ir a la barra de menú, pulsar BOUNDARY CONDITIONS, seleccionar ADAPT del menú desplegable y la malla se refinará. En el cuadro de diálogo inferior pasará a proporcionar los datos de la malla actual y al presionar en adaptar informará de los elementos de la nueva malla. Este proceso será necesario repetirlo dos veces, pasando de tener el número de celdas del principio a unas 195.000. No se podrá continuar refinando debido a que la versión académica tiene un número de celdas máximo de 512.000 y en el siguiente refinamiento se sobrepasarían este número límite. Esto se hace para obtener más precisión en el cálculo, aunque aumenta considerablemente el volumen de cálculo y el tiempo de resolución. Para comprobar la calidad de la malla se puede chequear desde GENERALS, y otra manera es al resolver el problema si los valores solución no varían o lo hacen de manera que no sean significativa.

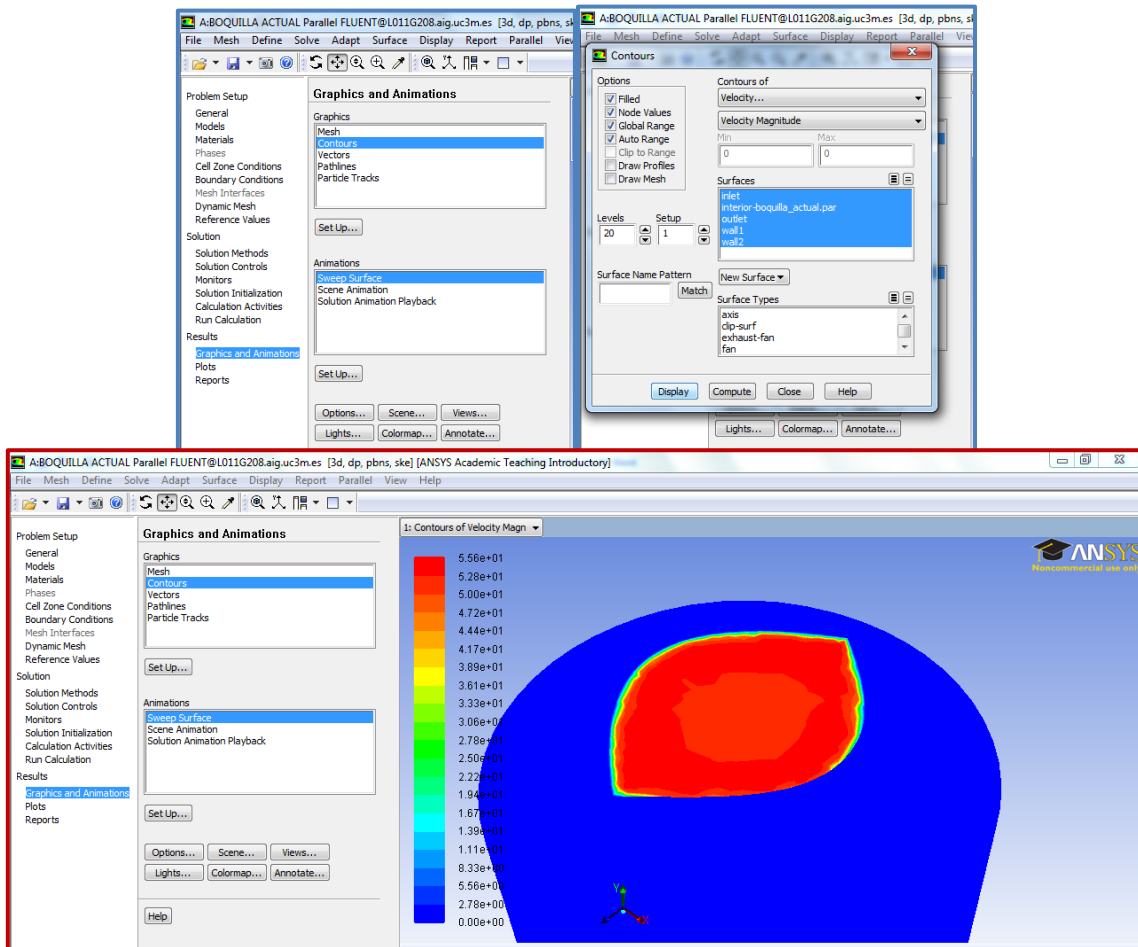
En definitiva, cuando se calcula un resultado es interesante valorar la solución, ya que quizás sea el paso más importante de todo el proceso. Es decir, saber los márgenes y que está ocurriendo en el proceso del cálculo de la solución. Tras observar los resultados, en cualquiera de los dos últimos refinamientos la precisión de los resultados de velocidad y caudal son casi idénticos (es el modelo de turbulencia el que no ofrece un error menor de  $10^{-4}$ ), por tanto los resultados se considerarán la malla aceptable. Tras este cambio la convergencia sucederá ahora en la iteración número 158.

La conclusión, es que hay que definir los mismos parámetros y los mismos criterios de convergencia para reducir los errores en las comparaciones. Es decir el número exacto de una solución puede variar, pero manteniendo fijos esos parámetros lo que si será correcto será la diferencia entre los modelos de boquillas, y el número dará una idea del resultado. Para el resto de iteraciones del modelo el criterio será de  $10^{-4}$  en todas las ecuaciones y de  $10^{-3}$  en las ecuaciones de turbulencia.

Por último lo, una vez converge el problema, hay que saber obtener los resultados. Esto se puede hacer directamente desde el programa FLUENT o volver al banco de trabajo con y abrir el módulo RESULTS, el proceso es el mismo. Hay que obtener principalmente dos datos, el caudal y la velocidad de salida.

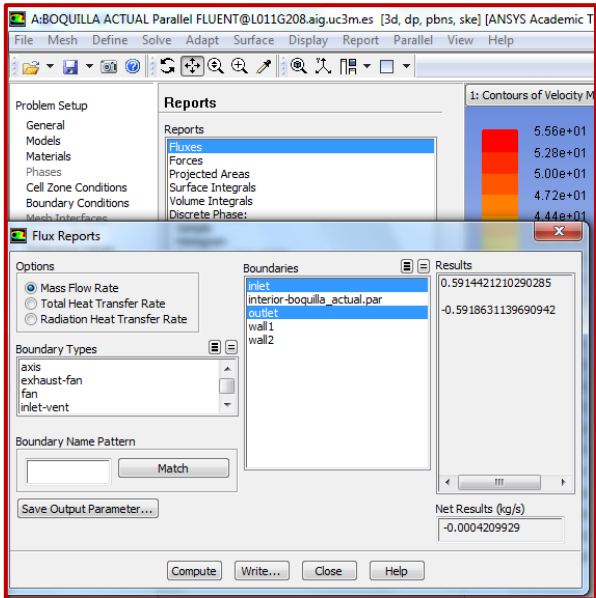


Para la velocidad hay que ir al paso RESULTS y clicar en GRAPHICS AND RESULTS, y seleccionamos CONTOURS. Presionamos dos veces y en el cuadro de dialogo que se abre, la primera pestaña pulsamos VELOCITY, en la segunda VELOCITY MAGNITUDE. Después seleccionamos FILLED y después seleccionamos todas las superficies en SURFACES, y por ultimo presionar hay que presionar DISPLAY. Saldrá la boquilla con los colores dependiendo de la velocidad. Tras esto podemos variar el rango de valores para mejorar la información.



El mismo proceso podemos hacer con vector con el fin de obtener más información sobre la velocidad.

Por último queda obtener el dato del caudal. Esto se puede obtener de los datos que el programa usa para resolver o parametros que se le puede pedir que calcule. En este caso, para obtener el dato del flujo hay que irse a RESULTS, FORCES y hay que clicar dos veces. En el cuadro de dialogo que salta, es necesario clicar MASS FLOW RATE y en el cuadro BOUNDARY seleccionamos la entrada INLET y la salida OUTLET. Tras marcar ambas superficies, presionamos COMPUTE y el programa facilitara el dato de caudal a traves de ambas superficie, y la diferencia entre ambas, que habla del error en el generado en la ecuación de continuidad.



Mass Flow Rate	(kg/s)
inlet	0.59046036
outlet	-0.59081314
Net	-0.0003527744

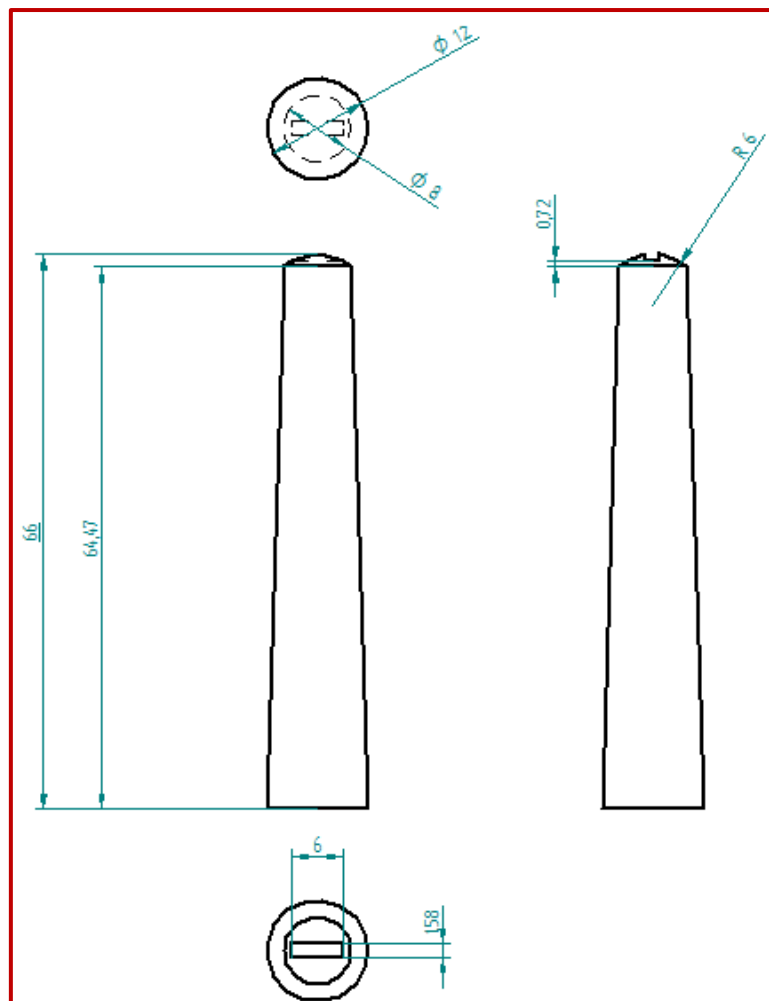
Los resultados que ofrece el programa son muy amplios, y es interesante explorar los resultados. Después de obtener todos los datos, hay que guardar el proyecto y cerrar el FLUENT. Por último habrá que comprobar que todos los puntos tienen un tic y guardar el proyecto de WORKBENCH y ya estará la zona fluida de la boquilla simulado y caracterizada.

## ANEXO III: MODELADO 3D DE LA BOQUILLA FINAL

---

Como ya se ha realizado el modelado de la parte interna, el siguiente tutorial se explica presuponiendo un cierto conocimiento y control del programa Solid Works (si no fuera así, las operaciones están explicadas paso a paso en el Anexo I). El modelo propuesto debe tener tres condiciones:

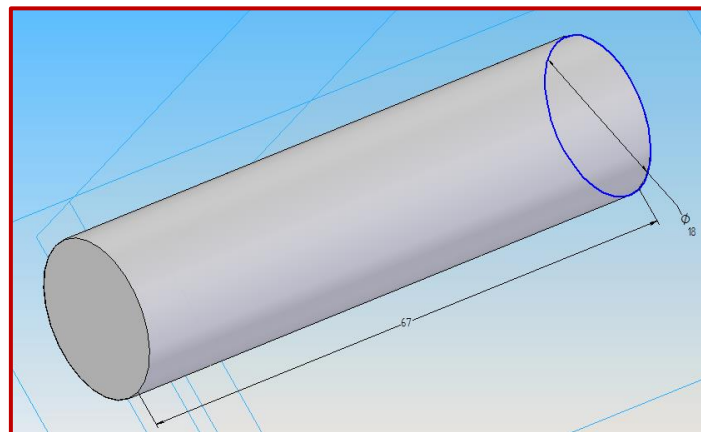
- El anclaje de a la manguera debe de ser el mismo normalizado que se usa actualmente
- Debe existir una zona hexagonal a modo de tuerca para facilitar la fabricación en el torno y como zona de anclaje de herramientas en el caso de que la boquilla no se pudiera desencajar de la manguera y sin bordes que puedan producir cortes.
- La condición inicial es que la parte interna (hueco) debe de ser igual que la modelada en la simulación (zona fluida). Para ello se debe de partir de los planos de la parte interna propuesta, como que debe de ser la zona hueca de la boquilla nueva:



Es importante tener estos datos para que la implantación de la boquilla sea directa, sin cambiar la manguera y fabricarla según la norma. Para el modelado de la boquilla, el proceso consta de 7 pasos.

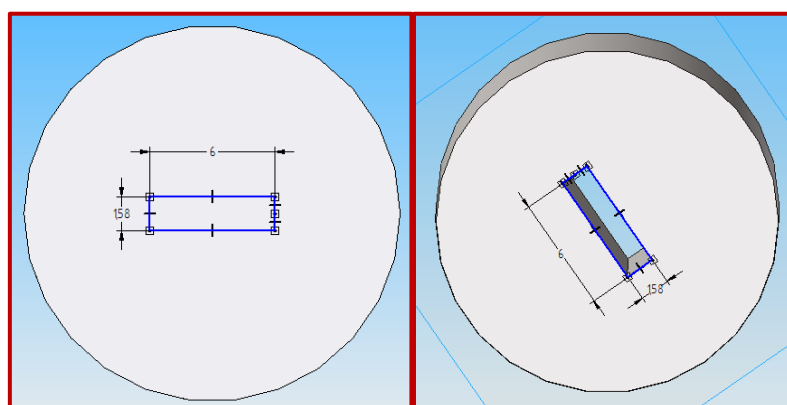
## PASO1 MODELADO DEL CUERPO

Se debe de realizar una protrusión en un plano, dibujando un círculo de 18 mm de diámetro y proyectándolo 67mm.



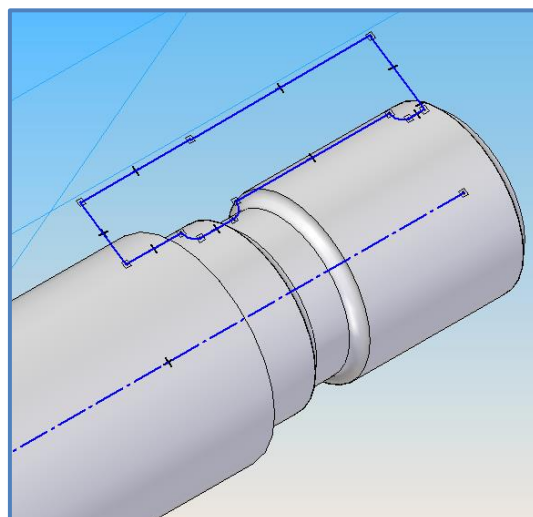
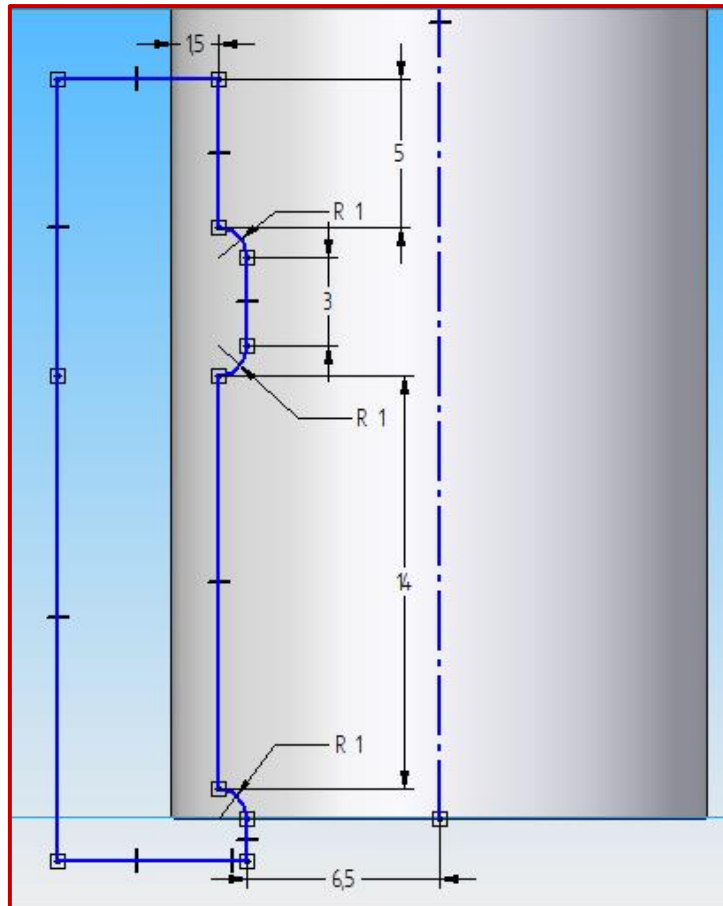
## PASO2 ORIFICIO DE SALIDA

Hay que realizar un vaciado que sera al agujero de la boquilla. Esto se hace tomando una de las caras del cilindro como plano de referencia, y se dibuja el rectángulo del orificio como se muestra en la figura. La longitud del vaciado debe de ser pasante.



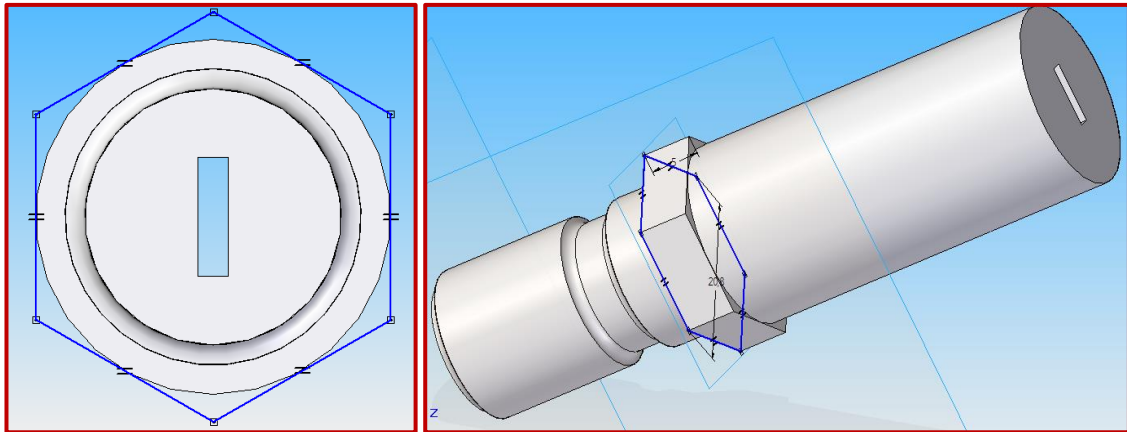
### PASO3 DISEÑO DEL ANCLAJE

El siguiente paso es dar forma al anclaje normalizado de diametro interno 12 mm. La funcion usada para ello sera el vaciado por revoluci3n. Se debe seleccionar un plano en el medio de la pieza, dibujar el eje y por ultimo dibujar el vaciado con las medidas indicadas en la imagen.



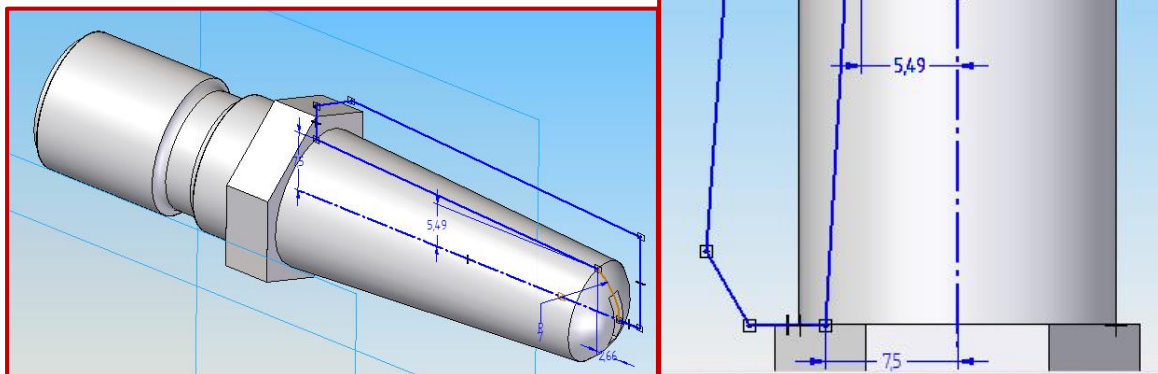
## PASO4 ROSCA HEXAGONAL

Para crear la forma hexagonal se debe de realizar una protrusión con forma hexagonal, tangente a la circunferencia y desde el plano donde empieza el anclaje. La distancia de protrusión será 5 mm.



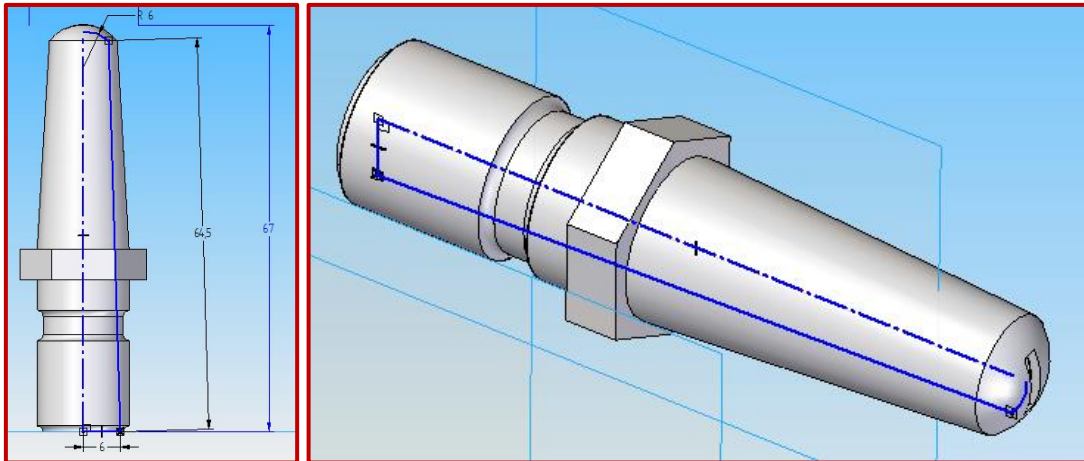
## PASO5 PUNTA DE LA BOQUILLA

Se trata de otro vaciado por revolución para acabar el terminal. Se debe de seguir el mismo proceso de seleccionar un plano que pase por el medio de la pieza, dibujar el eje y la zona de vaciado con las distancias de la figura.



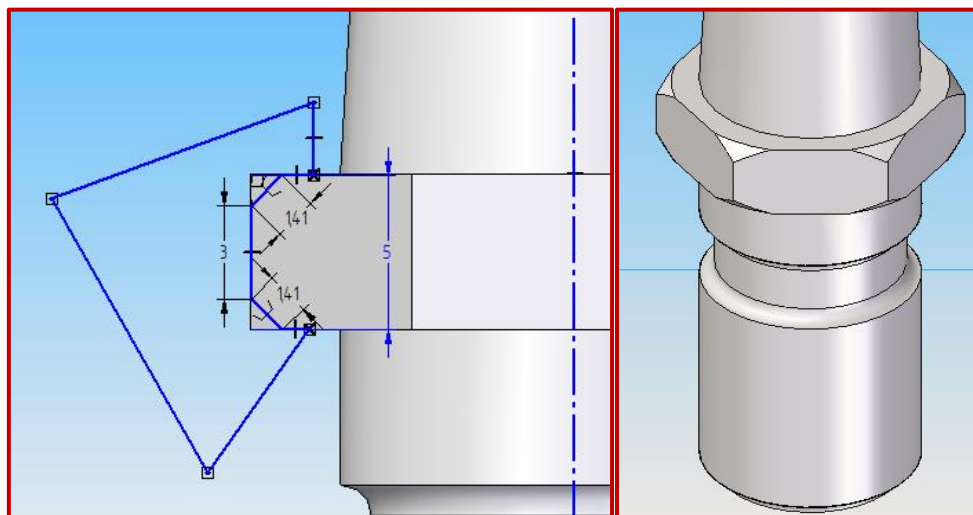
## PASO7 ZONA INTERIOR

Realizado del vaciado correspondiente al diseño interno de la boquilla. Tomando de cómo referencia de medidas los valores del diseño del interior de la boquilla, medidas cogidas de los planos del inicio.



## PASO8 ELIMINAR BORDES

Por normativa y para evitar lesiones y cortes, es importante rebajar las aristas vivas. En este caso solo existen en la zona hexagonal de la rosca.



## PASO9 COMPROBACIONES

Por último queda comprobar que el modelo cumple las condiciones de distancias y que el modelo está correctamente realizado. Para las mediciones debemos ayudarnos de la herramienta cota y distancia de elementos. Otro punto importante es la herramienta mostrar bordes. Se debe de comprobar que no haya errores en las operaciones. Si todo esta correcto se debe de guardar el caso con la extensión '---.par'

